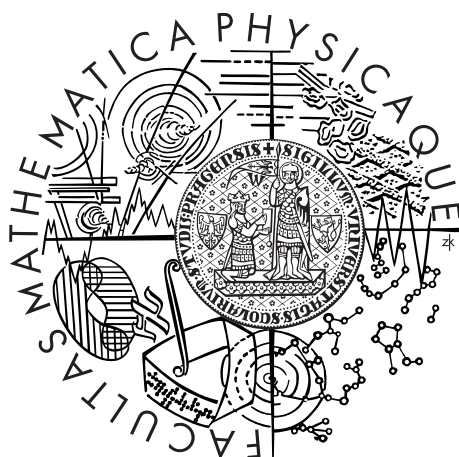


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Tomáš Nettl

Současné možnosti detekce bleskových výbojů v atmosféře

Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2011

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Mgr. Michalu Žákovi, Ph.D. za jeho cenné rady, ochotu a trpělivost v průběhu psaní mé bakalářské práce. Poděkování patří i mé rodině, která mně poskytovala oporu a zázemí při studiu a psaní bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Název práce: Současné možnosti detekce bleskových výbojů v atmosféře

Autor: Tomáš Nettle

Katedra: Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D., Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Abstrakt:

Cílem této práce bylo vytvořit přehled současných možností detekce bleskových výbojů v atmosféře, uvést jejich základní principy a vlastnosti. Dále pak charakterizovat systémy CELDN a LINET, které pokrývají Českou republiku, a zpracovat a porovnat data z těchto systémů.

První část se zabývá základními poznatky o blescích a základních elektrických vlastnostech atmosféry. Je uveden základní model rozložení oblačného náboje v bouřkovém oblaku a průběh elektrické intenzity v jeho okolí. Další část práce je zaměřena na základní principy detekce bleskových výbojů. Poslední část práce se věnuje základním vlastnostem systému CELDN a LINET, které pokrývají území České republiky, a obsahuje i porovnání těchto systémů na základě získaných dat.

Klíčová slova: CG a IC blesky, detekční systémy, CELDN, LINET

Title: Current possibilities of detection flash discharges in the atmosphere

Author: Tomáš Nettle

Department: Meteorology and Environment Protection

Supervisor: Mgr. Michal Žák, Ph.D., Meteorology and Environment Protection

Abstract:

The aim of this thesis is to make a survey about possibilities of detection atmospheric discharges, describe their principles and properties. The other aim of thesis is comparing the systems CELDN and LINET. These two systems cover the area of Czech Republic. The first part of this work concerns of basic characteristics of flashes and electric properties of the atmosphere. The basic model of air discharges distribution in a storm and an electric field around is mentioned. Then the thesis describes the basic flash detection systems and the methods of detection. The end of the work describes systems covering Czech Republic - CELDN and LINET. Also basic characteristics of these systems derived from real data are discussed.

Keywords: CG and IC flashes, detection systems, CELDN, LINET

Obsah

Úvod	2
1 Základní vlastnosti blesků	3
1.1 Typy a fáze blesku	3
1.1.1 Sestupný záporný blesk do země (CG-)	3
1.1.2 Kladný blesk bleskový výboj do země (CG+)	8
1.1.3 Oblačné bleskové výboje (Cloud Discharges)	9
1.2 Hrom	14
2 Elektrické vlastnosti atmosféry	15
2.1 Globální elektrický obvod	15
2.2 Pole pod bouřkovým oblakem	15
3 Možnosti detekce bleskových výbojů	19
3.1 Metody založené na měření amplitud elektromagnetického pole . .	19
3.2 Metody založené na měření elektromagnetického záření	20
3.2.1 Metoda DF	22
3.2.2 Metoda TOA	24
3.2.3 Systémy s velmi krátkou vzdáleností senzorů	24
3.2.4 Systémy s krátkou vzdáleností senzorů	25
3.2.5 Systémy s velkou vzdáleností mezi senzory	26
3.3 Interferometrie	26
3.4 Optické metody	27
3.4.1 Optické vlastnosti blesků	27
3.4.2 Pozemní optické stanice	27
3.4.3 Satelitní detekce bleskových výbojů	29
3.4.4 Satelitní systém zahrnující optickou a RF detekci	31
3.5 Schumannova resonance	32
3.6 Akustické a infrazvukové metody	32
3.7 Radary	33
4 Detekční systémy v ČR	35
4.1 CELDN (Central Europe Lightning Detection Network)	35
4.2 LINET (Lightning Location Network)	36
5 Porovnání systémů CELDN a LINET pro vybrané situace	38
Závěr	47
Seznam použité literatury	49
Přílohy	53

Úvod

Blesky patří mezi jedny z nejpůsobivějších projevů počasí, které provází lidstvo od jeho počátku. Pro své ničivé účinky byly blesky v mnohých kulturách považovány za projevy hněvu jakýchsi nadpřirozených sil nebo mytologických postav a lidé se jich snažili vyvarovat. První fyzikální teorie vzniku blesku pochází z 18. století, kdy dochází k rozvoji znalostí o statické elektřině. Podobnost některých elektrostatických jevů vede k předpokladu, že blesk je jejich jakási atmosférická obdoba. V roce 1752 provedl americký fyzik Benjamin Franklin svůj slavný pokus s drakem, čímž ukázal souvislost mezi bleskem a elektrostatickým jiskrovým výbojem. Hlavní snahy porozumět principu blesků byly motivovány zamezením škod, které blesky napáchají. Ve snaze zamezit škodám způsobeným úderem blesku sestrojil roku 1754 český učenec Prokop Diviš přístroj, který měl odvádět oblačnou elektřinu z mraku a zamezit tak vzniku blesků. Ve skutečnosti se jednalo o první bleskosvod, za jehož vynálezce je ale považován Benjamin Franklin.

I v dnešní době, kdy je většina budov vybavena hromosvody, jsou škody způsobené blesky velké. Ať už se jedná o požáry, výpadky proudu, ohrožení letecké dopravy nebo zranění při zásahu člověka. Ve snaze včasného varování před blesky i za účelem jejich výzkumu se začaly v druhé polovině 20. století vyvíjet systémy schopné detekce blesků. Hlavní důraz byl kladen na schopnost detekce blesků do země, které způsobují největší škody. Rozvoj těchto systémů pomohl odhalit a blíže popsat jednotlivé procesy při blesku, které se odehrávají uvnitř oblaku skryty běžnému pozorovateli. Tím se tyto systémy staly významným prostředkem pro výzkum blesků a bouřek. Začaly se rozvíjet nové metody a postupy, rostla přesnost detekce i schopnost rozlišovat blesky do země od mezioblačných výbojů.

Cílem této práce je vytvořit přehled současných možností detekce bleskových výbojů v atmosféře a uvést jejich základní principy a vlastnosti. Dále jsou porovnány systémy CELDN a LINET, které pokrývají oblast České republiky, a to jednak z hlediska metod a způsobů detekce blesků, tak i zpracováním konkrétních dat. Z porovnávaných dat byla snaha vyvodit základní vlastnosti a charakteristiky systémů CELDN a LINET. Zároveň byla uvedena i možná hypotéza způsobující tyto rozdílné charakteristiky mezi jednotlivými systémy.

1. Základní vlastnosti blesků

Blesk je elektrický výboj v atmosféře, který se nejčastěji vyskytuje v bouřkových oblacích, i když se může vyskytovat i např. oblacích popela vyvrženého sopkou nebo nad mohutnými požáry ([1]). V bouřkovém oblaku existuje specifické rozložení náboje - tzv. centra oblačného náboje (viz kapitola 2.2). Blesk pak může nastat mezi centrem oblačného náboje a zemí nebo mezi jednotlivými centry elektrického náboje v oblacích. Někdy se používá označení úder blesku, o kterém hovoříme v případě, že blesk zasáhne určitý objekt na zemi nebo ve vzduchu. I když se blesk jeví pro běžné pozorovatele jako spojitý jev trvající relativně krátký okamžik, ve skutečnosti se skládá z posloupnosti jednotlivých fyzikálních jevů, které se odlišují jednak fyzikálními vlastnostmi jako např. směr šíření náboje, velikost proudu, frekvence vyzařovaných elektromagnetických vln, doba trvání apod., tak i fyzikálními příčinami. I přes dnešní pokročilé znalosti v těchto oblastech fyziky není stále vytvořena jednotná teorie vysvětlující vznik a vývoj blesků.

1.1 Typy a fáze blesku

Blesk je důsledek elektrického průrazu ve vzduchu, který nastává při dostatečně silném elektrickém poli. Takto silné pole je důsledek přítomnosti center náboje uvnitř oblaku (viz podkapitola 2.2), které vznikají elektrostatickým nabíjením vodních a ledových částic při vzájemných kolizích ve vzestupných a sestupných proudech bouřkového oblaku a následným hmotnostním separováním (viz [1], [2] a[3]).

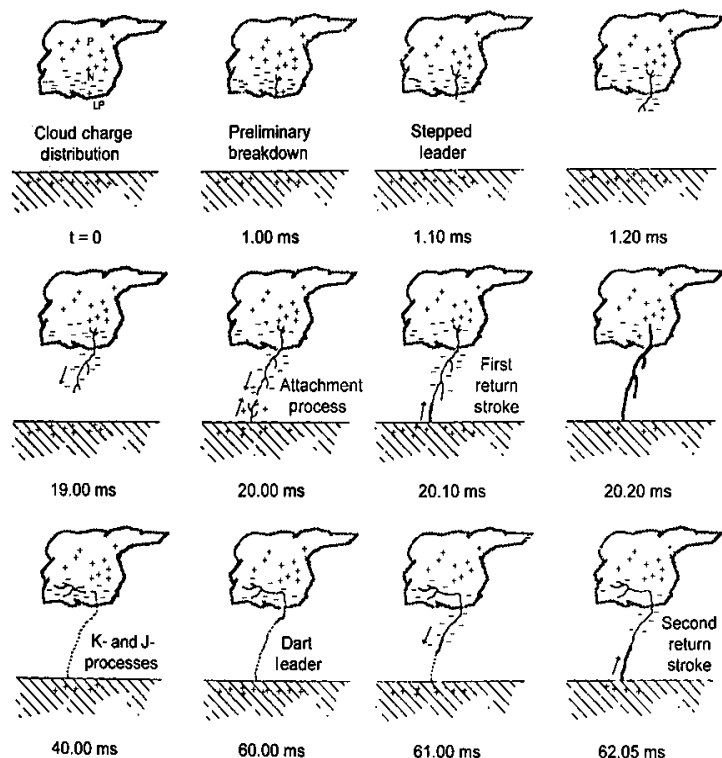
Podle místa výskytu rozlišujeme dva základní typy blesků: blesky mezi zemí a oblakem (CG - Cloud to Ground) a uvnitř oblaku (IC - Intra Cloud). Dle polarity elektrického náboje uvnitř oblaku, který je bleskem snížen (neutralizován), lze každý typ blesku dále rozlišit na pozitivní (+) a negativní (-).

Celý blesk je tvořen řadou procesů, z nichž jsou lidským okem pozorovatelné pouze ty, které nastávají uvnitř vodivého kanálu vně oblaku. Obecně souvisí všechny procesy při blesku s pohybem nabitých částic, proto mohou být měřeny pomocí elektrického a magnetického pole. Procesy související s elektrickým průrazem a urychlováním nabitých částic při prudkém nárůstu nebo poklesu proudu vyzařují charakteristické elektromagnetické záření v oblasti rádiových frekvencích (RF). Přesný způsob vzniku rádiového záření blesku není zcela vysvětlen, jedná se ale o důležitou vlastnost využívanou k detekci blesků (viz kapitola 3). Pro detekci bleskového výboje je důležitý poznatek, že s klesající vlnovou délkou záření klesá i vzdálenost, na kterou lze toto záření detekovat. Proto nelze detekovat záření velmi vysoká frekvence (VHF - Very High Frequency) na velké vzdálenosti, a naopak záření velmi nízké nebo nízké frekvence (VLF - Very Low Frequency, LF - Low Frequency) detekovat na vzdálenosti přes 1000km.

1.1.1 Sestupný záporný blesk do země (CG-)

Tento typ blesku tvoří až 90% všech CG blesků a jeho fáze jsou znázorněny na obr. 1.1, na kterém je nakreslena i základní struktura center oblačného náboje

bouřkového oblaku, náboje zemského povrchu (viz podkapitola 2.2) a jednotlivé procesy, které jsou níže popsány dle [2].



Obrázek 1.1: Schematické znázornění jednotlivých procesů při CG-. Obrázek převzat z [2]

Prvotní elektrický průraz (Preliminary Breakdown)

Jedná se o počáteční proces blesku. Trvá několik ms a jeho princip není zcela objasněn. Může se jednat o výboj, který překonává hlavní záporná a vedlejší kladná centra oblačného náboje. Je zdrojem záření v oblasti velmi vysokých frekvencí (VHF - Very High Frequency).

Krokový vůdčí výboj (Stepped Leader)

Tento výboj je tvořen negativně nabitým kanálem plasmy, která se pohybuje směrem k zemi rychlostí $2 \cdot 10^5 ms^{-1}$. Pohybuje se v tzv. krocích, kdy se po řádově $50m$ zastaví na $20 - 50 \mu s$, pak opět pokračuje v pohybu. Předpokládá se, že k zastavení dojde tehdy, poklesne-li intenzita elektrického pole v okolí čela výboje pod určitou kritickou hodnotu a výboj se už nemůže samovolně šířit. Během této doby intenzita elektrického pole opět narůstá, až překročí kritickou hodnotu a výboj se začne znovu šířit. Napětí mezi zemí a čelem výboje je řádově $10MV$. Dotkne-li se krokový vůdčí výboj země, vznikne tak vodivý kanál mezi oblačným nábojem a zemí, ve kterém je uloženo několik coulombů záporného náboje. Celková doba trvání je okolo $10ms$, proud ve výboji řádově $1kA$ a vyzařovaná frekvence od zhruba $1 - 200MHz$ ([1]).

Spojovací proces (výboj) (Attachment Process)

Nastává při přibližování krokového výboje zemi, čímž v této oblasti vzrůstá elektrické pole až dosáhne prahové hodnoty pro vzestupný kladně nabitý výboj směřující k čelu vůdčího výboje. Spojovací výboj zaniká při spojení s vůdčím sestupným výbojem.

Zpětný výboj (Return Stroke)

Vyskytuje se při propojení vodivého kanálu mezi zemí a oblakem. Jedná se o kladný výboj směřující od povrchu a neutralizující záporný náboj podél kanálu (nebo větve), který však nemusí neutralizovat záporný náboj úplně, nebo naopak může uložit přebytek kladného náboje do oblasti vodivého kanálu nebo oblaku. Zpětný výboj je nejviditelnější složkou CG blesku a může jím procházet krátkodobě proud až $30kA$, čímž se vodivý kanál může zahřát až na $30\,000K$ a tlak v něm roste až na $10atm$. Tím dochází k prudké expanzi okolního vzduchu a následná tlaková vlna tvoří nejintenzivnější část slyšitelného hromu. Při zpětném výboji dále dochází k prudkému zesílení světelné intenzity, která je nejlépe pozorovatelná lidským okem. Spolu se spojovacím výbojem je v oblasti země silným zdrojem VLF elektromagnetického záření, silně vyzařuje i ve vysokých frekvencích, obecně vyzařuje s rozsahem řádově $1 - 10kHz$ (dle [1]).

Po prvním zpětném výboji může blesk skončit. Častěji však v blesku nastávají další procesy, které následuje další výboj v již vzniklém vodivostním kanále - šípový výboj.

J- a K- procesy (J- and K- Process)

Nastávají uvnitř oblaku mezi zpětným a následným šípovým výbojem. J-proces je relativně pomalý kladný vůdčí výboj (Leader) z oblasti počátku bleskového kanálu do záporných oblastí oblaku. K- proces je relativně rychlý odražený výboj (Recoil Streamer) z čela kladného vůdčího výboje k počátku bleskového kanálu. J- proces se tedy skládá z jednotlivých K- procesů a obecně při těchto procesech dochází k ukládání negativního náboje podél vodivého kanálu (nebo jeho zbytku). K- proces může být považován za jakýsi náznak šípového výboje výboj. K-procesy jsou spojeny s charakteristickým zářením v rozsahu VHF a UHF (Ultra High Frequency - ultra vysoká frekvence).

Šípový výboj (Dart Leader)

Tento výboj se pohybuje k zemi rychlostí řádově 10^7ms^{-1} , většinou neprojevuje známky větvení, i když může jevit známky krokového chování v blízkosti země. Maximální proud při výboji může dosáhnout až $1kA$ a podél vodivostního kanálu dochází opět k uložení náboje o velikosti řádově $1C$. Některé šípové výboje mohou vytvořit zcela nový kanál mezi oblakem a zemí. Obdobně jako zpětný výboj i šípový výboj silně vyzařuje v oblasti VHF.

Následný zpětný výboj (Subsequent Return Stroke)

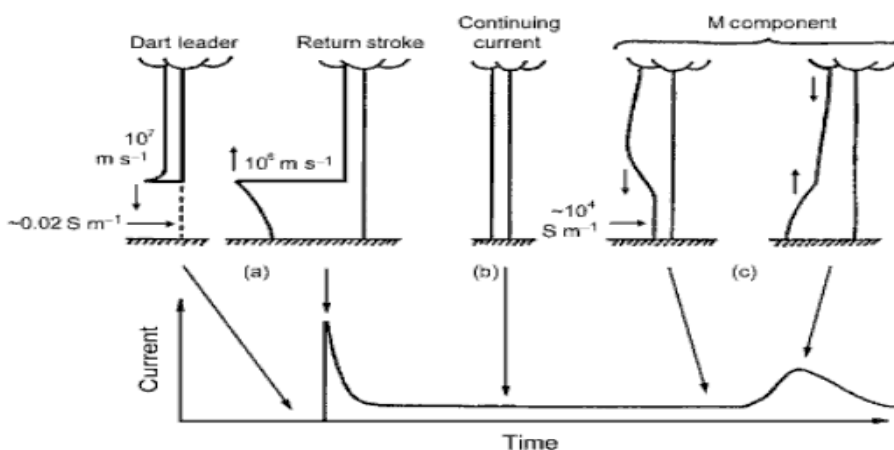
Jedná se o obdobu zpětného výboje, který ale nastává až po šípovém výboji. Proud při tomto výboji má velmi ostré maximum ($10 - 15kA$) a následně rychle

klesá.

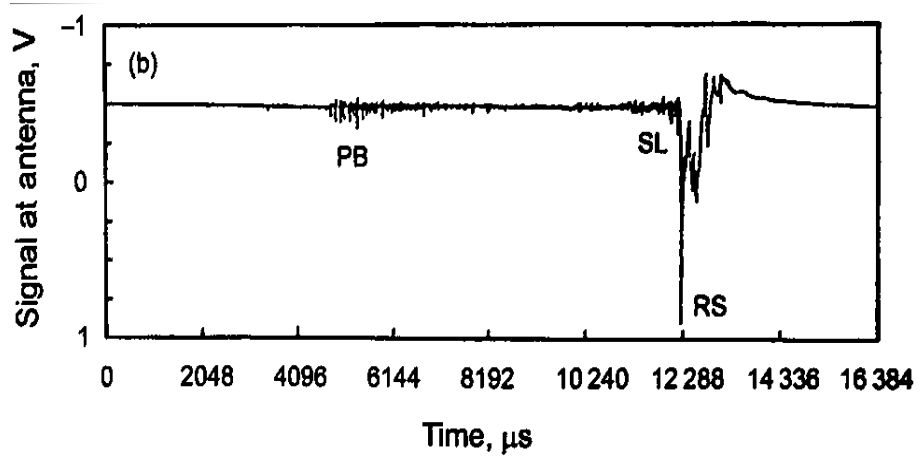
Průběžný proud (Continuig Current)

Poměrně často (i přes 50%) po následném zpětném výboji se vyskytuje průběžný proud o velikosti 10 - 100A trvající až stovky *ms*. Dá se považovat za částečně stabilní obloukový výboj mezi nabitou oblastí mraku a zemí. Zdrojem proudu je oblačný náboj, tedy opačný náboj než ve vodivostním kanálu. Při průběžném proudu se často vyskytují krátkodobá zesílení proudu a napětí. Tato zesílení jsou charakterizována zesílením jinak slabé zářivosti kanálu při průběžném proudu a označují se jako M-komponenty (M-components). Předpokládá se, že se jedná o superpozici dvou opačně se šířících vln (obr. 1.2 (c)). M-komponenty vyzařují v oblastech VHF a UHF elektromagnetického záření ([1]).

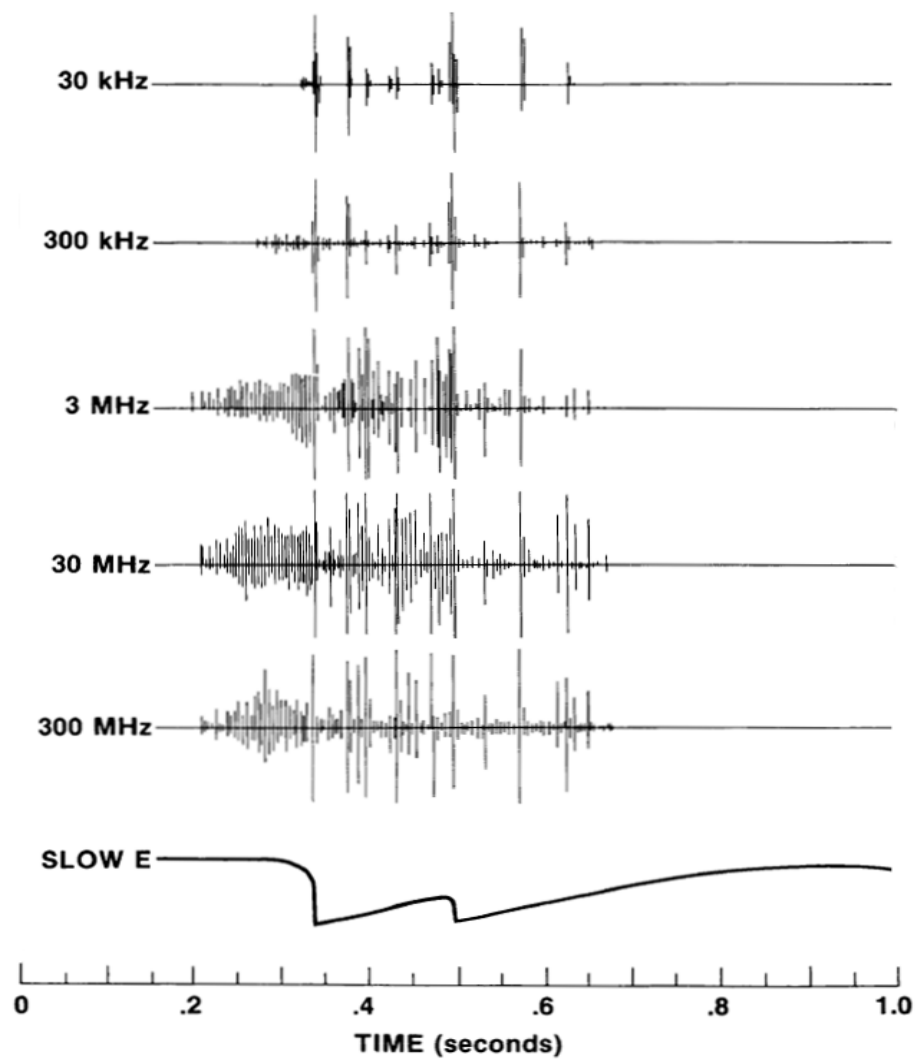
CG- blesk je tvořen nejčastěji 3 až 5 zpětných výbojů, zaznamenáno jich bylo i 26 (dle [2]). Celkový průběh elektrického pole i vyzářeného elektromagnetického záření pro CG- blesk je na obr. 1.3 a 1.4.



Obrázek 1.2: Schematické znázornění jednotlivých komponent pro CG-. V horní polovině obrázku je znázorněn název jednotlivé komponenty, velikost, rychlost, směr šíření a průběh proudu. V dolní části pak časový průběh celkové velikosti (ne polarity) proudu na zemi. Časový průběh proudu pro vůdčí výboj chybí, protože proud prochází až po dotyku vůdčího výboje se zemí, pak ale okamžitě nastává zpětný výboj s mnohem větším proudem. Sm^{-1} je jednotka vodivosti siemens na metr. Obrázek převzat z [2]



Obrázek 1.3: Elektrické pole pro CG- blesk. PB - prvotní elektrický průraz, SL - vúdčí krokový výboj, RS - zpětný výboj. Obrázek převzat z [2]



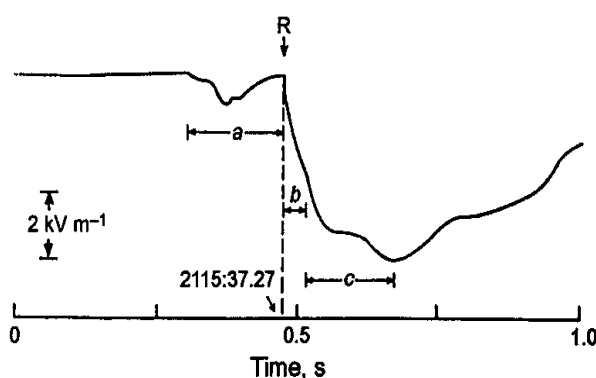
Obrázek 1.4: Změřené rádiové frekvence CG blesku pro dané frekvence. Obrázek převzat z [14]

1.1.2 Kladný blesk bleskový výboj do země (CG+)

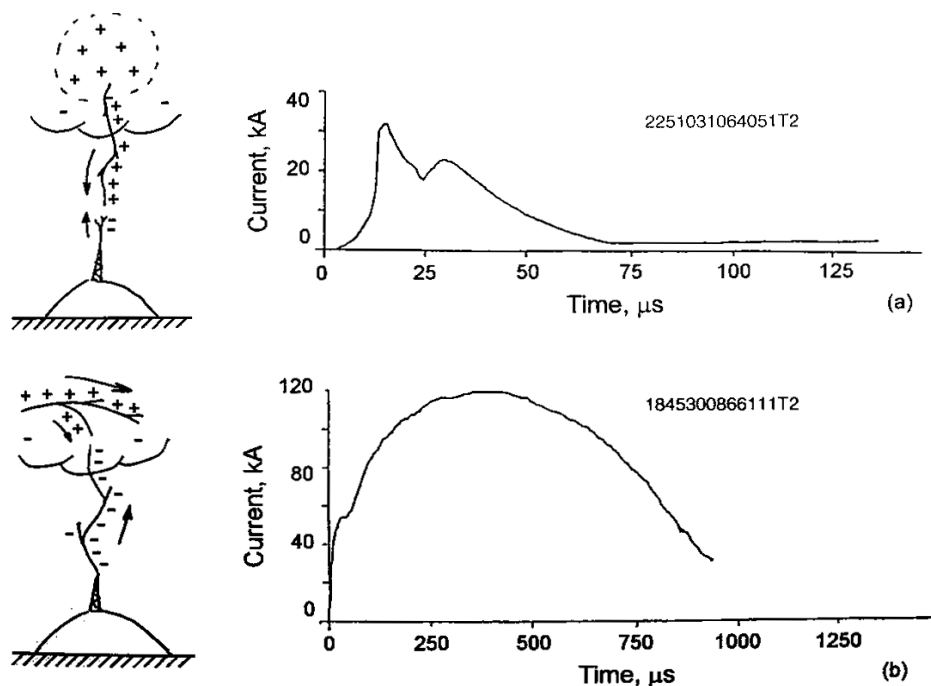
Kladný bleskový výboj neutralizuje kladné centrum elektrického náboje v oblaku, neboli přenáší kladný náboj z oblaku na zem. Předpokládá se, že CG+ blesky tvoří asi 10% všech CG blesků. Obecně je celkový náboj přenesený kladným bleskem mnohem větší než záporným. Pro CG+ blesk bylo dle [2] vypořazováno 5 základních vlastností charakterizující kladný výboj:

1. Kladný blesk se obvykle skládá pouze z jednoho úderu na rozdíl od záporného blesku, který je v 80% tvořen dvěma a více údery. Výskyt několika úderů kladného blesku je ojedinělý.
2. Po kladném zpětném výboji obvykle následuje průběžný proud trvající řádově 10 - 100ms o velikosti okolo 10kA, což je o řád vyšší hodnota než pro CG- blesku. Celkový náboj přenesený kladným bleskem (i přes 1000C) je obecně mnohem větší než pro záporné blesky, což je pravděpodobně způsobeno vysokými hodnotami průběžného proudu.
3. Při měření elektrického pole bylo pozorováno, že kladnému zpětnému výboji často předchází výrazný mezioblačný výboj trvající $\approx 100ms$. Lze předpokládat, že kladný výboj do země je spouštěn nějakou z větví mezioblačného výboje.
4. Dle některých zdrojů (viz [2]) obsahuje kladný výboj horizontální vodivostní kanály přesahující vzdálenosti přes 10km.
5. Kladný vůdčí výboj se může pohybovat spojitě nebo opět skokově. Záporné vůdčí výboje se pohybují převážně skokově. Proto elektrické a magnetické pole při kladném vůdčím výboji neprojevuje tak často skokové pulzy oproti zápornému vůdčímu výboji. Kladný vůdčí výboj vyzařuje slabší VHF záření oproti zápornému vůdčímu výboji.

Na obr. 1.6 jsou uvedeny dva typy pozorované Bergerem ([2]), na obr. 1.5 pak charakteristické pole pro kladný blesk mezi oblakem a zemí.



Obrázek 1.5: Charakteristická změna elektrického pole pro kladný blesk vzdálený 4km od místa pozorování. Časové intervaly a značí prvotní průraz až po vůdčí výboj (R), interval b zpětný výboj a c označuje průběžný proud. Obrázek převzat z [2]



Obrázek 1.6: Dva základní typy kladného výboje odvozené na základě proudové charakteristiky Bergrem. Obrázek převzat z [2]

Na přelomu 30. a 40. let minulého století se zjistilo, že existují blesky, které jsou charakteristické změnou polaritu proudu v průběhu blesku. Nazývají se bipolární bleskové výboje, tvoří 5 – 33% CG blesků ([2]) a obvykle jsou iniciovány vzestupným vůdčím výbojem z vyvýšených objektů. Předpokládá se, že jsou způsobeny vzájemně izolovanými vzestupnými bleskovými kanály sahajícími do oblastí kladných a záporných center oblačného náboje. Jejich podrobnější popis je obsažen v [1] a [2].

1.1.3 Oblačné bleskové výboje (Cloud Discharges)

Oblačný výboj lze rozdělit na výboj:

- uvnitř oblaku (Intracloud Discharge) - je omezen pouze na jeden bouřkový oblak
- mezioblačný výboj (Intercloud Discharge) - nastává mezi jednotlivými bouřkovými oblaky
- vzdušný (Air Discharge) - výboj mezi bouřkovým oblakem a vzduchem

Souhrnně se tyto výboje označují oblačné blesky (intracloud flash - IC). Předpokládá se, že tvoří až 75% všech blesků. V raném stadiu vývoje bouřky mají převážně vertikální charakter, v pokročilém stadiu bouřky jsou naopak charakterizovány horizontálně orientovaným větvením výboje. Ve vznikající bouřce převažují právě IC blesky. Předpokládá se, že by výrazný nárůst počtu IC blesků mohl souviset s narůstající intenzitou bouřky (viz [1]), tedy s výskytem přívalových srážek, nárazovitým větrem, kroupami apod. IC blesky nejsou tak dobře prozkoumány

jako CG. Je to dáno jednak sníženou možností pozorování IC uvnitř oblaku, ale také nemožností přímo změřit proud nebo náboj, jako lze při uměle vyvolaných blescích do země (Triggered Lightning - viz [1] a [2]).

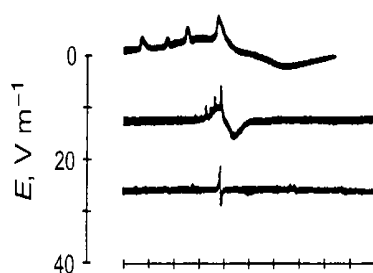
Oblačný výboj se dá dle [2] rozdělit do dvou fází - aktivní (Active nebo Early) a konečná (Final nebo Late) fáze (Stage).

Aktivní fáze

Obvykle se skládá ze záporně nabitého bleskového kanálu, který se nespojitě šíří rychlostí řádově 10^5ms^{-1} a trvá přibližně 10 – 100ms. Aktivní fázi lze považovat za období k prvotnímu průrazu a krokovému vůdčímu výboji při CG blesku. Oblačný blesk obvykle začíná v oblastech s nejvyššími hodnotami elektrického pole, tedy na spodních nebo horních hranicích záporně nabitého centra oblačného náboje a při svém pohybu prochází dalšími centry oblačného náboje. Počátek výboje je charakterizován největší změnou elektrického pole, která trvá několik μs a může zahrnovat tzv. bipolární pulzy. Lze jej považovat za období počátečních výbojů při CG blesku. Velmi pravděpodobně se počáteční fáze IC blesku skládá z obousměrného vůdčího výboje (Bidirectional Leader), jehož kladná část proniká do oblasti záporně nabitého oblačného náboje a záporná část do kladně nabitých oblastí. Kladná část výboje navíc částečně slouží jako dalším zdroj záporného náboje, který pak skrz vodivostní kanál prochází do záporné části výboje, který má podobné vlastnosti jako krokový vůdčí výboj.

IC blesk začíná inicializačním průrazným výbojem (Initial Breakdown), při kterém lze rozlišit dva základní časové průběhy elektrického pole - tzv. bipolární časový průběh nebo vlna (Bipolar Waveform - viz [1], [2]):

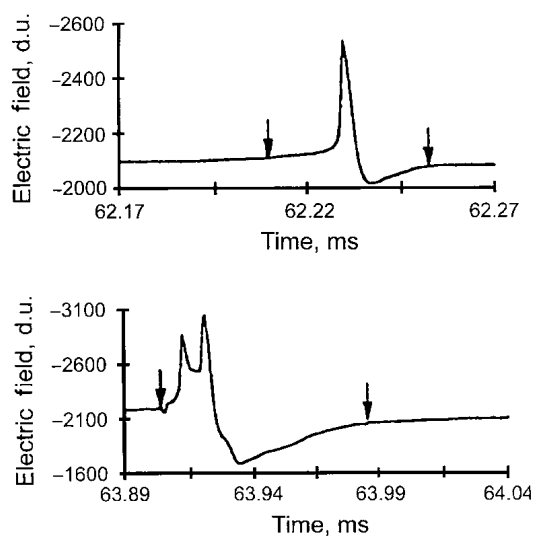
1. pozvolný náběh s několika malými pulzy před hlavní bipolární vlnou - obr. 1.7



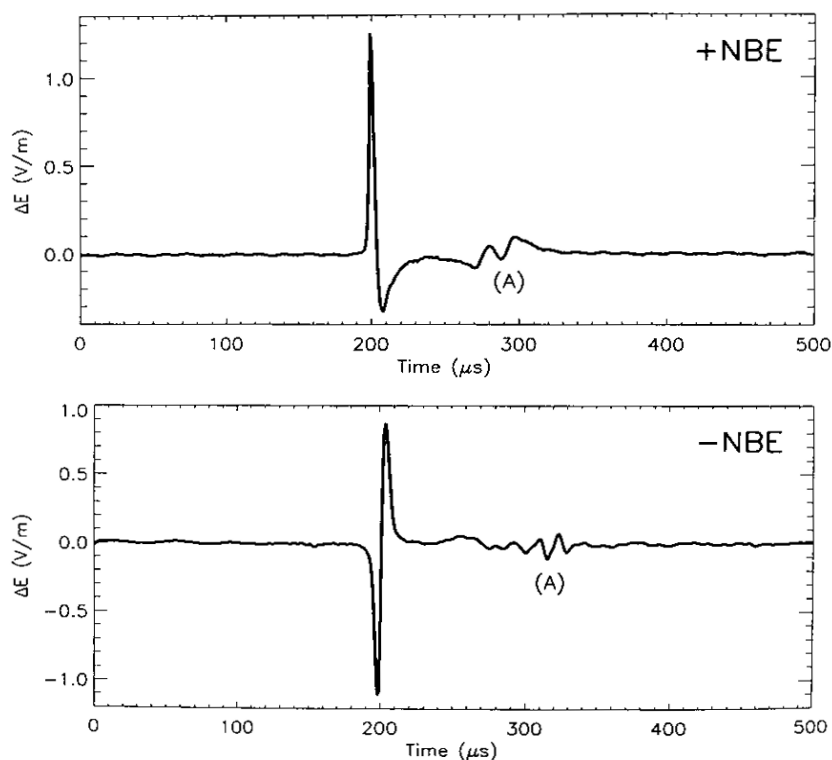
Obrázek 1.7: Celkový průběh elektrického pole pro IC blesk při inicializačním průrazném výboji. Na horizontální ose je znázorněn čas. Jeden dílek na časové ose odpovídá 2ms (spodní část), 40 μs (prostřední část) a 8 μs (horní část). Obrázek převzat z [2]

2. relativně rychlý a hladký náběh bipolární vlny s jedním (NBP - Narrow Bipolar Pulses nebo NBE - Narrow Bipolar Events) obr. 1.9 nebo více lokálními maximy obr. 1.8.

Inicializační průrazné výboje trvají zhruba 50 - 80 μs , což je asi dvakrát déle než při CG-. NBE vyzařují v HF oblasti elektromagnetického záření po dobu 10 – 15 μs , což je až desetkrát déle v porovnání s ostatními CG nebo IC fázemi.



Obrázek 1.8: Celkový průběh elektrického pole pro IC blesk při inicializačním průrazném výboji. Horní část značí NBE, spodní vlnu více lokálních maxim. Obrázek převzat z [2]



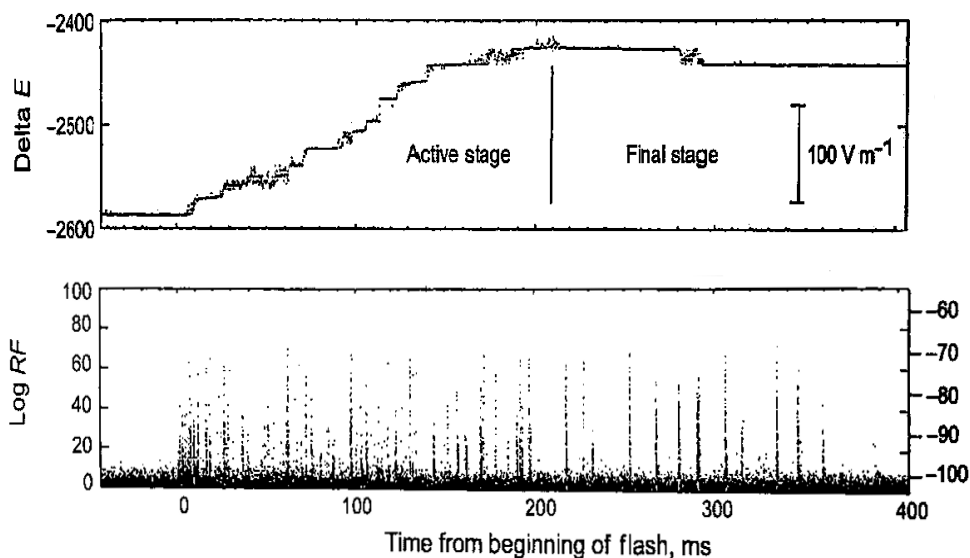
Obrázek 1.9: Změna elektrického pole pro kladné +NBE (horní obrázek) a záporné -NBE (spodní obrázek). Blesk byl vzdálen 500km , (A) značí od ionosféry odražené NBE záření. Obrázek převzat z [1]

Přechod z aktivní fáze nastává, když se přeruší vodivostní kanál mezi kladnými a zápornými částmi výboje a zastaví se tím pohyb záporného výboje.

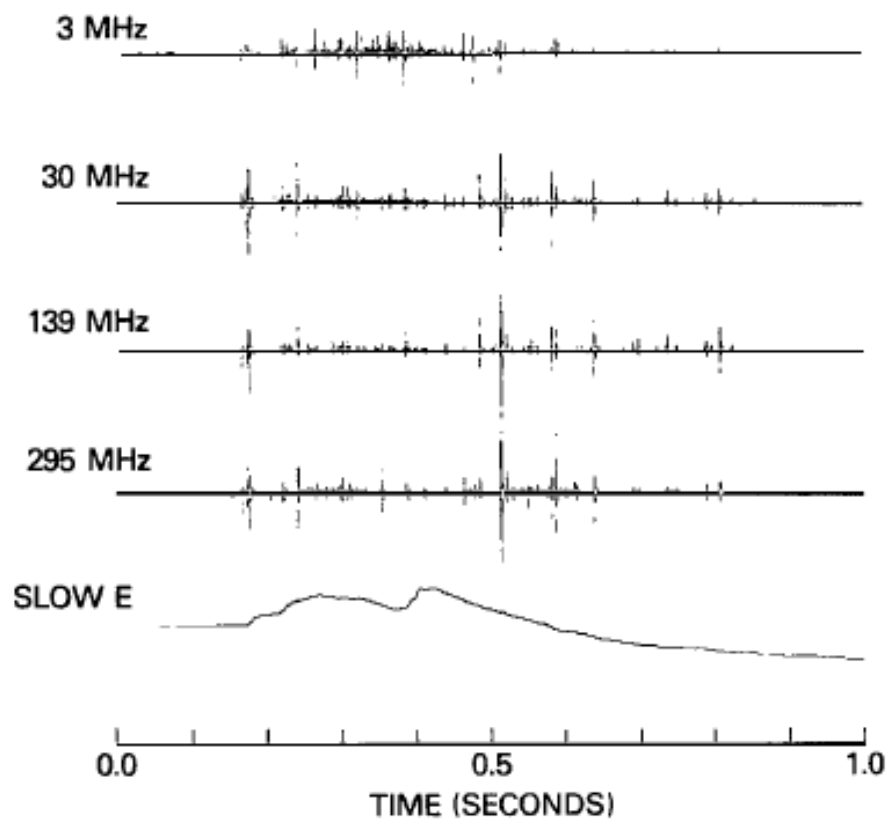
Konečná fáze

Změny elektrického pole při této fázi se velmi podobají J- a K- procesům při CG blesku (podkapitola 1.1.1), proto se předpokládá, že tyto procesy jsou shodné. Při J-změnách (J-changes) se jedná o kladně nabitý vodivostní kanál, který se rozšiřuje od místa počátku blesku rychlostí řádově 10^4ms^{-1} . J-změny jsou tvořeny K-změnami (K-changes) nebo též zpětnými trsovými výboji (Recoil Streamers). Jejich vlastnosti silně závisí na okolních podmínkách podél vodivostního kanálu, a mohou se vyskytnout i několikrát po sobě. K-změny jsou charakterizovány rychlými, často skokovými změnami elektrického pole, proto se dají považovat za období šípového krokového vůdčího výboje (podkapitola 1.1.1). S K-procesy velmi pravděpodobně souvisí mikrosekundové pulzy, které jsou velmi podobné pravidelným shlukům pulzům v CG blesku. Celkově J- a K- změny přenášejí záporný náboj ze vzdálenějších záporně nabitých center oblačného náboje do míst počátku blesku.

Na obrázcích 1.10 a 1.11 jsou uvedeny průběhy elektrického pole a frekvenční spektrum pro celkový IC blesk.



Obrázek 1.10: Horní část zobrazuje průběh změny elektrického pole v čase, spodní část amplitudu RF záření pro IC blesk, na pravé ose je odrazivost $\text{dBm}^{-2} \text{MHz}^{-1}$. Obrázek převzat z [2]



Obrázek 1.11: Změřený průběh RF záření pro různé frekvenční rozsahy při IC blesku včetně průběhu intenzity elektrického pole. Obrázek převzat z [13]

1.2 Hrom

Hrom lze definovat jako akustickou emisi v důsledku bleskového výboje. Velmi pravděpodobně se všechny impulsivní procesy v CG nebo IC blesku podílejí na vzniku hromu. Slyšitelný hrom (prahová frekvence $20Hz$) se skládá z řady degenerovaných prudkých změn tlaku, které jsou důsledkem prudkého rozpínání vzduchu při rychlém zahřátí bleskového kanálu, především při zpětném výboji. Změny tlaku se pohybují průměrně v rozpětí $0,2$ až $2,4Pa$ v závislosti na vzdálenosti blesku a tlaková vlna hromu se skládá obvykle ze dvou až čtyř tlakových pulzů trvajících $0,2$ až $2s$. Frekvenční spektrum hromu je od několika Hz do několika kHz . Infrazvuková složka hromu (pod $20Hz$) pravděpodobně souvisí s přeměnou elektrostatische energie pole na infrazvukové vlnění při prudké změně pole v důsledku blesku, ale tato teorie není potvrzena. Hrom lze v průměru slyšet do vzdálenosti okolo $25km$ a doba trvání závisí na vzdálenosti nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu bleskového kanálu od pozorovatele, navíc zdrojem zvukových vln jsou i oblačné výboje předcházející zpětnému výboji. Proto hrom může trvat až okolo deseti vteřin. Spektrum hromu závisí na vlastnostech daného blesku, některá spektra mají maxima v infrazvukové oblasti a některá v oblasti desítek až stovek Hz .

2. Elektrické vlastnosti atmosféry

Již v druhé polovině 18. století se zjistilo, že atmosféra má elektrické vlastnosti nejenom při bouřce, ale i při klidném ovzduší (fair weather - jasno, slabý vítr atd.). Dalšími měřeními se ukázalo, že i v klidné atmosféře existuje stálé vertikální elektrické pole s intenzitou u povrchu řádově $100Vm^{-1}$.

2.1 Globální elektrický obvod

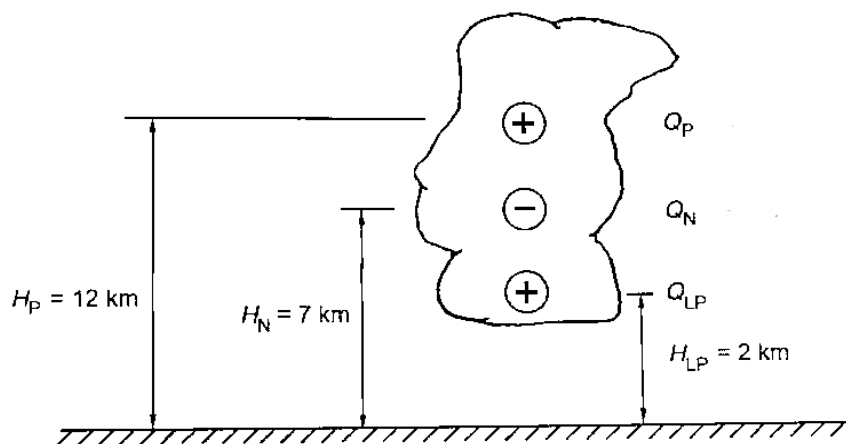
Oblast atmosféry nad $60km$ se nazývá ionosféra. V této oblasti jsou vlivem pohlcování kosmického záření tvořeny ionty, proto je tato oblast elektricky vodivá a hlavní nosičem náboje jsou zde elektrony. Pod $50km$ není zastoupení iontů tak velké, přesto zde koncentrace iontů není nulová, a to ani u povrchu. Příčinou je jednak část kosmického záření pronikající i do těchto výšek a také ionizační záření z radioaktivních prvků. Vodivost vzduchu u povrchu je řádově $10^{-14}Sm^{-1}$ a rychle s výškou klesá. Při klidném ovzduší směřuje vektor elektrické intenzity \vec{E} k povrchu. To znamená kladný náboj ve vyšších vrstvách atmosféry a záporný na povrchu země. Vžitá konvence označuje tento vektor jako záporný (dle konvence $\vec{E} = -\nabla\varphi$, kde φ je potenciál elektrického pole).

Dle klasického pohledu na elektrické vlastnosti atmosféry je ionosféra považována za ekvipotenciální plochu stejně jako povrch Země. Soustava země - ionosféra se potom dá považovat za sférický kondenzátor. Vzduch ale není dokonalý izolátor a za podmínek klidného ovzduší by docházelo k vybíjení, až by se kondenzátor vybil. Protože je však elektrické pole za klidného ovzduší přibližně konstantní, musí existovat nějaký dobíjecí mechanismus. Za tento mechanismus lze považovat převážně bouřkovou činnost, při které je dodáván záporný náboj zemskému povrchu formou blesků a tím dochází k jeho dobíjení (dle [3]).

2.2 Pole pod bouřkovým oblakem

Bouřkový oblak neboli cumulonimbus je hlavním zdrojem blesků na Zemi. Jedná se o oblak s výrazným vertikálním vývojem, který je charakterizován silnou konvekcí, výskytem center oblačné elektřiny a často i bleskovou činností. Různé teorie vzniku oblačné elektřiny a rozmístění náboje do oblačných center jsou uvedeny v [1], [2] a [3], tato látka ale přesahuje zadané téma práce. Rozmístění center oblačné elektřiny má vliv na výsledné elektrické pole v okolí oblaku. Základní představa rozmístění center elektrického náboje má tripólovou strukturu - v horních patrech oblaku je shromážděn kladný náboj, ve středních patrech náboj záporný a v nízkém patře je opět kladný náboj.

Pro výpočet elektrického pole v okolí bouřkové oblaku s tripólovou strukturou náboje budeme uvažovat model dle obr. 2.1, kde jednotlivá centra náboje budeme uvažovat za bodová rozmístěná nad sebou a vodivý zemský povrch jako nulovou ekvipotenciálu. Tuto úlohu budeme řešit metodou zrcadlení. Pro vertikální (z -tovou) složku intenzity E_z pak máme (dle [2] nebo [3])



Obrázek 2.1: Model tripólového vertikálního rozložení nábojů v bouřkovém oblaku. Převzato z [2]

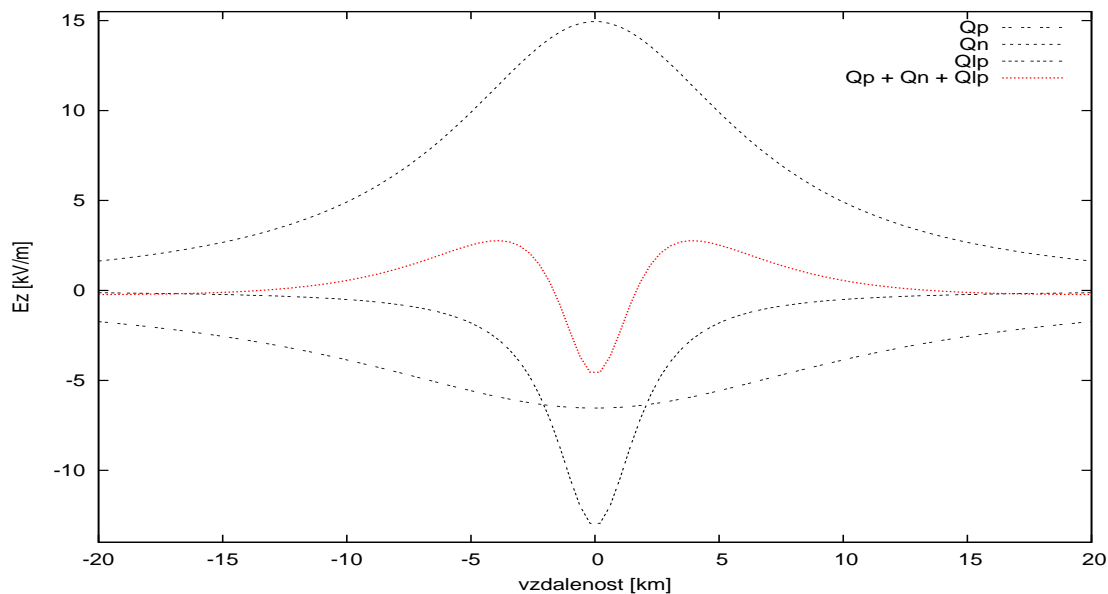
$$\begin{aligned}
 E_z &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \sin(\alpha) + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-Q}{R^2} \sin(-\alpha) = \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{(H^2 + r^2)} \frac{H}{(H^2 + r^2)} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-Q}{(H^2 + r^2)} \frac{(-H)}{(H^2 + r^2)} = \\
 &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{(H^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

kde r je vzdálenost mezi místem výpočtu E_z a místem na povrchu, nad kterým se centra elektrického náboje nachází, H je výška centra elektrického náboje nad povrchem a Q jeho náboj. Průběh takového pole je znázorněn na obr. 2.2 pro náboje $Q_p = 60C$, $Q_n = -80C$, $Q_{lp} = 20C$, výšky nabitých center odpovídající obr. 2.1 a výsledné pole, které je superpozicí dílčích elektrických polí. Výsledný průběh vertikální složky E_z je na obr. 2.2. Pro pozorovatele pod bouřkovým oblakem je dominantní vliv záporně nabitého centra v oblaku a E_z se jeví jako záporná (E_z směřuje k povrchu). V určité vzdálenosti od bouřkového oblaku začnou mít dominantní vliv na E_z centra kladného náboje a dojde k polarizaci E_z (kladná polarizace - E_z směřuje k oblaku). Tento model rozložení center oblačného náboje je kvantitativně ve shodě s pozorováním.

Při bleskovém výboji dojde k přenosu náboje v oblaku, tudíž i ke změně elektrického pole. Zde rozebereme dva limitní případy.

Předpokládejme, že hlavní centrum záporného náboje je úplně neutralizováno CG do země. Potom změna intenzity E_z je záporná ve všech vzdálenostech od oblaku, protože E_z směřující od povrchu (kladný směr) vymizí společně se záporným centrem a začne převládat vliv kladných center se E_z směřující k povrchu (záporným směrem).

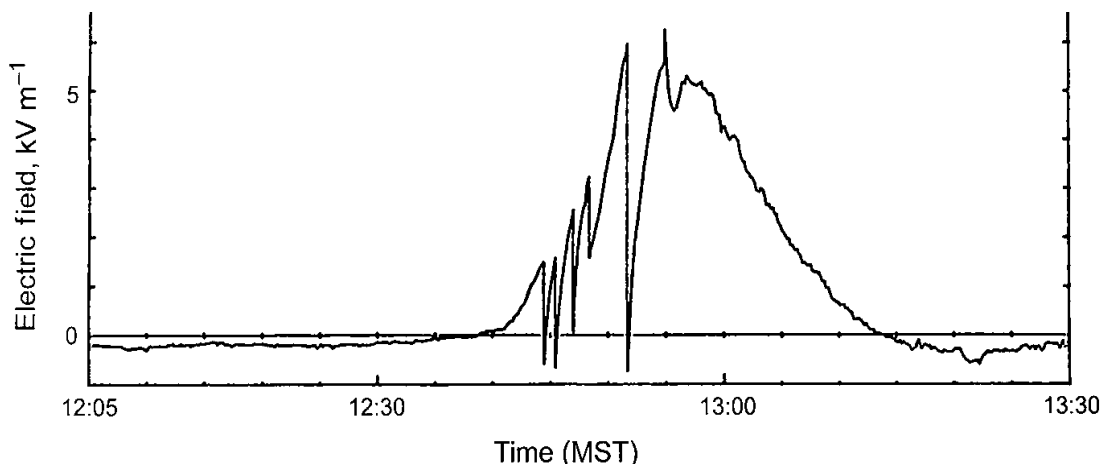
Druhý případ předpokládá, že se hlavní kladné i záporné centrum neutralizuje vlivem IC blesků. Celková změna elektrického pole je záporná do určité vzdálenosti, ve které dojde k přepólování pole a jeho změna je pak kladná. To je důsledek toho, že v této vzdálenosti bylo dominantní centrum kladného náboje a



Obrázek 2.2: Průběh vertikální složky elektrické intenzity E_z v okolí bouřkového oblaku s tripólovým rozmístěním náboje pro jednotlivé náboje i jako výsledné pole jako superpozice jednotlivých intenzit

celková intenzita byla záporná. Po zmizení hlavních center intenzita v této oblasti vzroste, i když celková intenzita bude vlivem podružného kladného centra stále záporná.

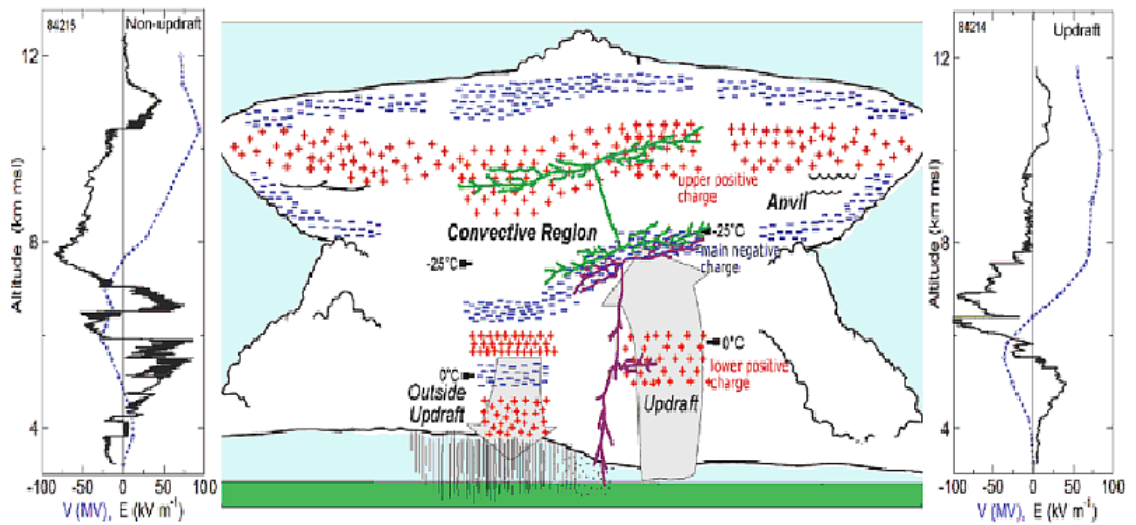
Na obr. 2.3 je znázorněna změřená vertikální složka elektrické intenzity. Je patrná oblast zhruba stálé intenzity až do 12:35 - 12:40, kdy rodící se bouřka změni polaritu pole. Tato bouřka prodělá svůj zrod i rozpad v přibližně konstantní vzdálenosti 5 km od místa měření. Po rozpadu bouřky se elektrická intenzita vrací zhruba na svoji původní hodnotu.



Obrázek 2.3: Elektrické pole a jeho časový průběh na zemském povrchu pro 5 km vzdálenou bouřku v Novém Mexiku 3.8.1984 - výrazné poklesy intenzity jsou způsobeny bleskovou činností. Obrázek převzat z [2].

Pro srovnání je na obr. 2.4 uvedeno schematické rozložení náboje, průběh elektrické intenzity a potenciálu ze skutečného bouřkového oblaku. Tyto hodnoty jsou

získané z balónových měření v Novém Mexiku. Měření probíhalo ve vzestupných i sestupných proudech a měřeny byly hodnoty elektrické intenzity E a potenciálu V . Schematicky jsou znázorněny IC blesky (zelené) a CG blesky (fialové).



Obrázek 2.4: Schematický model bouřky v středních zeměpisných šířkách zkonstruovaný na základě balónových měření. Obrázek převzat z [1].

3. Možnosti detekce bleskových výbojů

3.1 Metody založené na měření amplitud elektromagnetického pole

Známe-li konkrétní matematický tvar rovnice popisující elektrické nebo magnetické pole pro daný bleskový proces, potřebujeme takový počet detektorů měřící elektrické nebo magnetické pole, jako je neznámých proměnných. Pak lze neznámé proměnné z rovnice určit. V tomto přiblížení lze při znalosti rovnice pro elektrostatické pole z jeho celkové změny při blesku určit náboj přenesený bleskem nebo pro místo úderu CG blesku.

Tato metoda byla poprvé použita roku 1976. Vycházela z jednoduchého modelu, kdy dojde bleskovými výboji k neutralizaci celého oblačného náboje. Příklad aplikace této metody pro CG výboje je uveden dle [2]. Funkce chí-kvadrát pro CG výboje je definována

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta E_{mi} - \Delta E_{ci})^2}{\sigma_i^2} \quad (3.1)$$

kde ΔE_{mi} je změřená změna elektrické intenzity na i -té stanici, ΔE_{ci} je teoreticky spočtená hodnota změny elektrického pole na i -té stanici, σ_i^2 je rozptyl vlivem chyby měření na i -té stanici a N je počet stanic. Nejjednodušší model vychází z předpokladu, že ΔE_{ci} je teoretická změna pole na každé pozemní stanici, každá stanice leží ve výšce $z_i = 0$, Q je neznámá velikost sféricky symetrického oblačného náboje, jenž se nachází na neznámých souřadnicích (x, y, z) , dále je povrch země považován za dokonale vodivý a že celkový náboj Q bude neutralizován CG blesky. Potom z rovnice (2.1) lze psát pro celkovou změnu elektrického pole

$$\Delta E_{ci} = \frac{2Qz}{4\pi\epsilon_0((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.2)$$

Tuto rovnici lze použít na blesky, které udeří do země. V (3.2) jsou 4 neznámé - x, y, z a Q , proto potřebujeme změřená data ze 4 stanic. Dostupnost dat z více než 4 stanic umožní přesnější určení chyb při odhadu neznámých. Dosazením rovnice (3.2) do (3.1) a minimalizací takto vzniklé rovnice pro χ^2 dostaneme hodnoty Q, x, y, z a χ^2 slouží jako faktor určující přesnost proložení. V [2] je krátká diskuze ohledně úpravy a výsledků (3.1) s odkazy na jednotlivé autory.

Rovnici (3.1) lze superpozicí rozšířit i pro model oblačného IC výboje nebo mezioblačné procesy CG blesku za předpokladu, že teoreticky spočtená změna elektrického pole E_{ci} je důsledek neutralizace dvou center náboje stejné velikosti, ale opačného znaménka. V tomto případě je třeba uvažovat za zdroj pole elektrický dipól. Počet neznámých by v tomto případě byl 7, což je i minimální počet měřících stanic. Za předpokladu, že vzdálenost mezi náboji dipólu je malá oproti vzdálenosti náboje od stanice, lze aproximovat dipól jako tzv. bodový dipól, pro

který platí dle [2]

$$\Delta E_{ci} = \frac{2Qz}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2\Delta p_z}{R_i^3} - \frac{6z}{R_i^5} \mathbf{R}_i \cdot \Delta \mathbf{p} \right] \quad (3.3)$$

kde $\Delta p = \Delta p_x \mathbf{a}_x + \Delta p_y \mathbf{a}_y + \Delta p_z \mathbf{a}_z$ je vektor změny dipólového momentu, $\Delta \mathbf{l}$ je vektor vzdálenosti mezi kladným a záporným nábojem a $\Delta \mathbf{R}_i = (x - x_i) \mathbf{a}_x + (y - y_i) \mathbf{a}_y + z \mathbf{a}_z$ je vzdálenost mezi místem pozorování (i -tá stanice) a bodového dipólu. V (3.3) je 6 neznámých x , y , z , Δp_x , Δp_y a Δp_z . Minimální počet stanic je tedy 6. Aproximace dipólu na bodový dipól však vede ke ztrátě některých informací, např. pozice nábojů pro jednotlivé dipóly.

Existují i další metody a postupy, které vychází z rovnic (3.2), (3.3), případně i (3.1) nebo jinak rozpracovávají nastíněné metody (viz [2]).

Pro měření intenzity elektrického pole se používají tzv. polní mlýnky (Field Mill). Popis takového zařízení lze nalézt např. v [17]. Další možností je použití speciálních antén.

Při vzdálenosti několika kilometrů od blesku je zpětný výboj charakterizován ostrým lokálním maximem v časovém průběhu elektrického i magnetického pole. Z úvah uvedených v [2] vyplývá, že amplituda elektromagnetického pole klesá nad dokonale vodivým rovným povrchem jako $\frac{1}{r}$, kde r je vzdálenost místa pozorování od blesku. Z toho plyne, že teoretická pole E_{ci} předpokládaná daným modelem musí být opravena na tvar (dle [2])

$$E_{ci} = \frac{E_0}{((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2)} \quad (3.4)$$

kde E_0 je velikost elektrického pole v jednotkové vzdálenosti od bleskového kanálu. Obdobná rovnice platí i pro magnetické pole.

Ve skutečnosti ale není povrch dokonale vodivý a není ani rovný. Elektromagnetické pole proto klesá rychleji, ale obecně se tento pokles nedá určit. Proto tyto metody nejsou tak přesné. Přesto se používají v kombinaci s jinými metodami zpřesnění detekce.

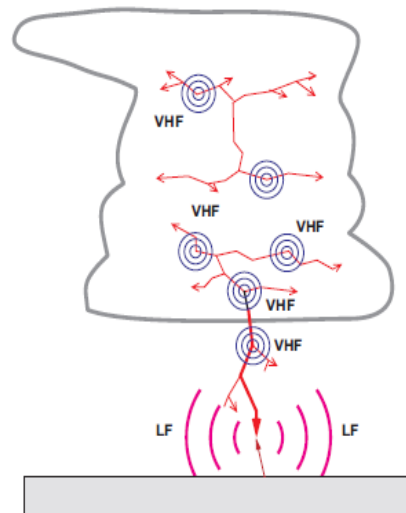
Pro reálnější popis elektrického a magnetického pole jsou v [1] a [2] uvedeny a diskutovány složité výrazy pro vertikální složku elektrické intenzity a horizontální složku magnetické indukce. Toto téma ale přesahuje rámec této práce.

3.2 Metody založené na měření elektromagnetického záření

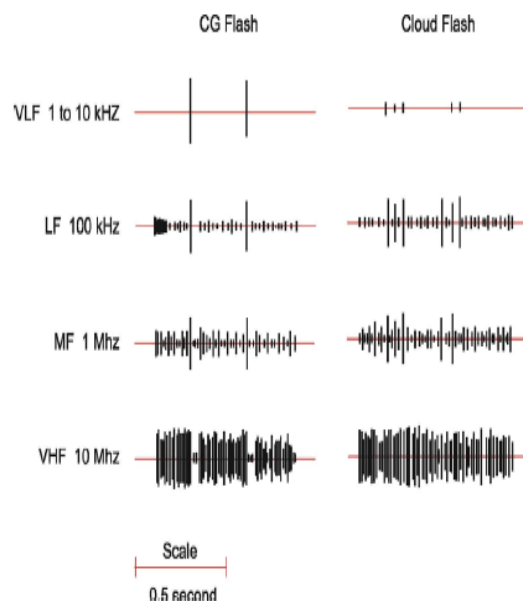
Jak již bylo zmíněno kapitole 1, blesk se skládá z posloupnosti fyzikálních procesů, které jsou charakterizovány typickým elektrickým a magnetickým polem. Při urychlování nabitých částic dochází k vyzařování elektromagnetického záření. V blesku dochází k těmto procesům při rychlých změnách velikosti proudu procházející vodivostním kanálem, proto je blesk zdrojem elektromagnetického záření, a to převážně v rozsahu $1Hz$ až $300MHz$. Nejintenzivnější oblast je v rozmezí $5kHz$ - $10kHz$, blesk ale vyzařuje i v jiných frekvencích, které lze použít pro detekci, např. v mikrovlnné oblasti nebo v oblasti viditelného záření. Na obr. 3.1 je schématické prostorové rozložení zdrojů RF záření v bouřkovém oblaku, na obr. 3.2 pak porovnání RF záření pro CG a IC blesk.

Nejpoužívanější metody měření frekvence elektromagnetického pole jsou určování směru (překlad dle [4]) (DF - Direction Finding), čas příchodu (překlad dle [4]) (TOA - Time of Arrival) a interferometrii. Tyto metody jsou založeny na měření frekvence elektromagnetických signálů f .

- Velmi vysoká frekvence (VHF - very high frequency) - $f = 30 - 300\text{MHz}$
- Velmi nízká frekvence (VLF - very low frequency) - $f = 3 - 30\text{kHz}$
- Nízká frekvence (LF - low frequency) - $f = 30 - 300\text{kHz}$



Obrázek 3.1: Schématický zobrazení zdrojů RF záření při CG a IC blesku. Obrázek převzat z [11].



Obrázek 3.2: Porovnání RF záření při CG (vlevo) a IC (vpravo) blesku. Obrázek převzat z [12].

Systémy detekující převážně CG blesky pracují ve LF/VLF rozsahu, ve kterém silně vyzařuje zpětný výboj. Systémy detekující VHF záření detekují především jednotlivé vůdčí výboje v bleskovém kanálu (zdroj VHF záření). Nejpřesnější systémy detekce blesků mají nepřesnost určení polohy řádově 100m, naopak systémy detekující blesky na vzdálenost přes 1000km (VLF) mají nepřesnosti řádově desítky až stovky kilometrů a tak slouží pouze jako systémy sledování celkových bouřkových systémů. Pro co nejpřesnější určení polohy bleskového kanálu nebo místa úderu blesku je potřeba několika senzorů, které tvoří detekční systém.

3.2.1 Metoda DF

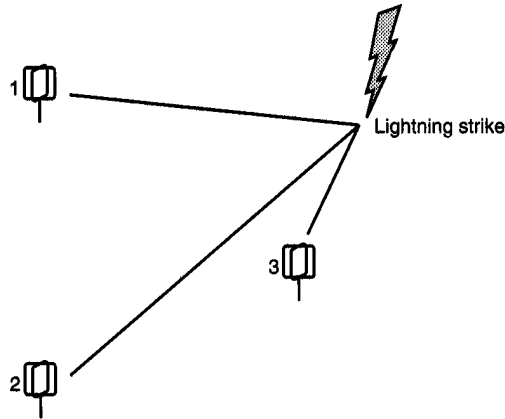
Název této metody pochází z anglického Direction Finding (nebo též MDF - Magnetic Direction Finding), což by se dalo přeložit jako určení směru zdroje magnetického pole. Tato metoda využívá Faradayova indukčního zákona.

Pro dvě navzájem kolmé vodivé smyčky, z nichž jedna leží v rovině orientované ze severu na jih (NS) a druhá z východu na západ (EW). Tyto smyčky mohou díky Faradayově indukčnímu zákonu měřit magnetické pole i směr z vertikálně orientovaného zdroje, pro který lze uvažovat horizontálně orientované magnetické pole, které pro blesk aproximovaný jako vertikální vodič tvoří horizontální soustředné kružnice. To je důsledek toho, že napětí indukované na smyčce je úměrné vektoru magnetického pole násobené cosinem úhlu, který svírá vektor magnetického pole a normála smyčky. Protože jsou smyčky vůči sobě ortogonální, napětí na jedné smyčce je úměrné cosinu a druhé sinu úhlu mezi vektorem magnetického pole a normálou dané smyčky. Poměr napětí je tedy úměrný tangentě úhlu, z čehož lze dopočítat úhel mezi severem a zdrojem magnetického pole (azimutální úhel dle [2]). Není-li při CG výboji známa polarita, máme k dispozici dva azimutální úhly vzájemně posunuté o 180°. Tuto nejednoznačnost lze odstranit současným měřením elektrické pole nebo použitím více DF detektorů. Z polarity elektrického pole pak lze určit znaménko náboje přeneseného na zemský povrch. Pozice blesku se pak určí v průsečíku přímkou o daném azimutálním úhlu z více stanic (viz obr. 3.3) Za předpokladu, že vyzařované elektrické pole je vertikálně orientované, musí mít magnetické pole horizontální orientaci. To lze přibližně splnit pro počáteční fáze zpětného výboje při CG blesku.

Dvě vzájemně ortogonální vodivé smyčky určené k detekci směru (DF - Direction Finders) blesku lze rozdělit na dva typy:

- Úzkopásmové DF - pracují v úzkém rozsahu v okolí stanovené frekvence, která je určena v rozsahu 5 až 10kHz. V tomto rozsahu je detekovaný signál relativně výrazný a zeslabování vlivem odrazu od ionosféry malé.
- Širokopásmové DF - pracují v širokém pásmu frekvencí. Pro zdroje vzdálené méně než 200km je chyba této metody řádově 10°, což je způsobeno detekcí magnetického pole, které není horizontálně orientované (zdroj není vertikálně orientován) nebo od ionosféry odraženými magnetickými vlnami, které opět nemají horizontální orientaci.

Pro zmenšení chyby detekce v širokopásmových rozsazích byla v 70. letech použita metoda vzorkování (Gated Wideband DF). Tato metoda předpokládá, že známe informace o pulzu – dobu trvání a tvar. Spočívá v nastavením detektoru, který je zapnutý jen po určité době. Převrácená hodnota této doby je označena



Obrázek 3.3: Schématické znázornění určení polohy blesku metodou MDF. Obrázek převzat z [11].

jako vzorkovací frekvence. Vypínáním a zapínáním detektoru na předpokládanou dobu trvání pulzu lze eliminovat polarizační chybu. Časovým vzorkováním NS a WE komponenty DF lze detekovat počáteční impuls magnetického pole při zpětném výboji. Tento impuls nastává během prvních mikrosekund zpětného výboje, proto je vyzářen ve spodní části (výška okolo $100m$) bleskového kanálu, která bývá vertikálně orientovaná, tudíž má horizontálně orientované magnetické pole. DF s metodou vzorkování nastavenou na daný pulz pak odfiltruje rušivé signály včetně vln odražených od ionosféry, protože ty přichází po poměrně dlouhé době od počátečního impulsu. Frekvenční rozsah této metody je od několika kHz do $500kHz$ ([2]).

Původně byla metoda DF s vzorkováním signálu navržena pouze pro detekci CG- blesků, v 80. letech ale byla upravena i pro detekci CG+ blesků.

Vzorkovací DF metoda je ovlivněna řadou chyb. Náhodné chyby při měření jsou dány převážně šumem, který je důsledkem nedokonalosti vodičů a elektronických zařízeních zpracovávajících příchozí signály. Vliv může mít i magnetické pole od jiných zdrojů, jako například vysílače apod. Tuto chybu však lze eliminovat nastavením vhodné detekční frekvence detektoru. Systematické chyby měření jsou dány vlastnostmi okolí - zakřivení magnetického pole vlivem členitosti povrchu nebo přítomností vodivých objektů, které mohou zpětně vyzářit signál z bleskového výboje. Tyto chyby lze korigovat softwarově. Výsledná chyba bývá menší než 2° až 3°

Pro určení polohy bleskového výboje je potřeba alespoň dvou DF detektorů. Pro co nejpřesnější měření se DF detektory seskupují do sítí a tvoří tak detekční systém.

Důležitou charakteristikou je účinnost detekce bleskových výbojů. Celková účinnost systému lze jen odhadnout, protože přesný počet blesků nelze přesně zjistit. Nejmodernější systémy DF senzorů mají odhadovanou účinnost přes 90%, jsou schopny určit pozici výboje s přesností $0,5km$ a mají dosah řádově stovky kilometrů.

Pro systém N DF detektorů se pozice výboje zjistí opět minimalizací výrazu

pro χ^2 (dle [2])

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\theta_{mi} - \theta_i)^2}{\sigma_{\theta_i}^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(E_{mi} - E_i)^2}{\sigma_{E_i}^2} \quad (3.5)$$

kde θ_i , resp. E_i je neznámý azimutální úhel, resp. elektrické pole, θ_{mi} , resp. E_{mi} je změřený azimutální úhel, resp. změřená amplituda elektrického pole na i -tém detektoru. σ s příslušným spodním indexem značí odhadovanou chybu.

Moderní systémy složené z DF detektorů jsou schopny měřit pozici blesku, polaritu, velikost proudu i časový interval mezi jednotlivými výboji během blesku, nejistotu měření i hodnotu χ^2 .

3.2.2 Metoda TOA

Principem této metody je měření doby mezi příchodem elektromagnetického signálu na jeden a následně i druhý senzor detektoru, což je v angličtině označeno jako Time of Arrival, zkráceně TOA. Je-li znám časový rozdíl mezi detekcí dvou senzorů, z geometrické definice pak plyne, že množina všech bodů v prostoru, které mají konstantní časovou diferenci od senzorů (respektive konstantní rozdíl vzdáleností od dvou pevných ohnisek), tvoří hyperboloid. Jako senzor se používá citlivá anténa a rozlišují se tři hlavní typy systémů podle vzdálenosti senzorů (dle [2]):

- velmi krátká vzdálenost - senzory jsou vzdáleny desítky až stovky metrů
- krátká vzdálenost - senzory jsou od sebe desítky kilometrů
- dlouhá vzdálenost - senzory jsou od sebe vzdáleny stovky až tisíce kilometrů

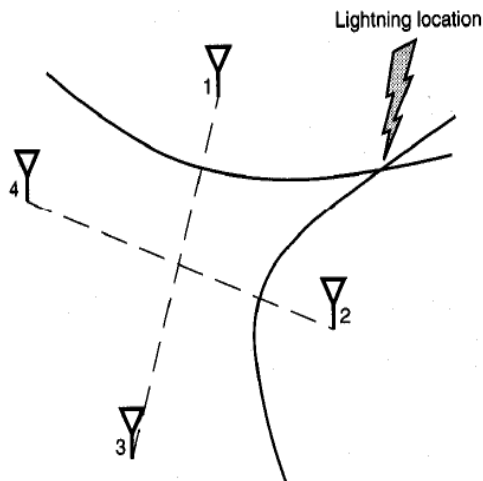
První dva typy obvykle pracují ve VHF frekvencích v rozsahu 30 – 300 MHz a používají se pro mapování a vývoj bleskových kanálů a výbojů. Vzhledem k vysoké frekvenci záření je třeba hustší síť senzorů. Třetí typ pracuje ve VLF a LF frekvencích 3 – 300 kHz (senzory proto mohou být dále od sebe) a detekuje úder blesku do země i jejich pozici. Hlavním zdrojem VHF frekvencí bývá elektrický průraz elektronů ve vzduchu, zatímco zdrojem VLF je proudový tok již vytvořeným bleskovým kanálem.

Signál, který detekuje TOA systém, lze rozdělit podle časového průběhu do tří fází - náběh pulzu (asi do 1/2 maxima pulzu), maximum pulzu a pokles pulzu. Časový průměr z těchto tří událostí je zpracován jako čas detekce senzoru a následně zpracován. Pro určení polohy a času (4 neznámé) výskytu blesku je třeba 4 stanic. Použitím více stanic lze zpřesnit měření využitím různých optimalizačních metod. Chyba při určování polohy zdroje, který se nachází uvnitř sítě detektorů, je menší než 100m.

3.2.3 Systémy s velmi krátkou vzdáleností senzorů

Tyto detekční systémy jsou charakterizovány takovou vzdáleností mezi senzory, aby doba, za kterou dospěje elektromagnetický VHF puls od jednoho senzoru k jinému, byla mnohem kratší než doba mezi následnými pulzy. Doba mezi těmito pulzy bývá v rozmezí jednotek až stovek μs . Jsou-li senzory velmi blízko u sebe, z hyperboloidu značícím všechny možné teoretické polohy zdroje signálu

se limitním přechodem stane rovina, ve které byl detekován zdroj pulzu. Znalost dvou časových diferencí jednoho pulzu znamená znalost dvou rovin, v jejichž průsečíku leží zdroj pulzů. Tato metoda je ve 2D ilustračně znázorněna na obr.(3.4). Limitujícím faktorem této metody je velmi přesné určení a syn-



Obrázek 3.4: Určení polohy blesku pomocí metody TOA. Obrázek převzat z [11].

chronizace času na senzorech. To se v dnešní době děje pomocí GPS a čas lze měřit s přesností v desítkách *ns*. Na celkovou chybu měření má vliv jakékoli opoždění detekovaného signálu na senzoru oproti ideálně se šířícímu signálu. Toto zpoždění může být způsobeno prodloužením dráhy signálu vlivem členitosti povrchu, špatnou synchronizací času na senzorech nebo detekcí různých fází signálu na různých senzorech v důsledku narušení signálu vlivem okolí apod. První systém byl navržen v roce 1969, skládal se ze tří detekčních antén, které byly vzdáleny od 30 do 300m a pracovaly v rozsahu frekvencí 30 – 100MHz. Tento systém měřil azimutální úhel od zdroje pulzů.

V průběhu času se tato metoda zdokonalovala, zaváděly se nové antény, měnil se frekvenční rozsah a navrhovala se různá konstrukční řešení systému.

3.2.4 Systémy s krátkou vzdáleností senzorů

Jako příklad takového systému lze uvést systém LDAR.

Systém detekující blesky a jejich rozsah (LDAR - Lightning Detection nad Ranging) byl vyvinut v Kennedyho vesmírném středisku. Skládá se z celkem 7 měřících stanic, centrální frekvence je 66MHz s rozsahem 6MHz. Jednotlivé senzory jsou soustředěny do oblasti s průměrem 20km a jsou schopny detekovat blesky vzdálené více než 100km s rozlišovací schopností v řádu 100m. Centrální stanice určuje vzorkovací dobu (obvykle 82μs) všech ostatní stanic. Přesný čas výskytu největšího pulzu v tomto časovém intervalu je změřen na každé stanici zvlášť, následně je poslán na centrální stanici, kde je započteno zpoždění vlivem konečné rychlosti šíření této informace. Z rozdílu časů výskytu největšího pulzu na stanicích je přes daný algoritmus spočteno místo výskytu zdroje pulzu ve 3D. Odhadovaná účinnost pro blesky vzdálené do 100km téměř 90%.

Další pokrok přinesla mobilní verze systému LDAR, která byla vyvinuta v New Mexico Institute of Mining and Technology. Tento systém je synchronizován pomocí GPS technologie a díky své mobilitě a relativně rychlé instalaci lze použít na různých místech.

3.2.5 Systémy s velkou vzdáleností mezi senzory

První systém pochází z roku 1960 a skládal se ze dvou senzorů, které určovaly směr bleskového výboje. Jeho princip byl v podstatě stejný jako pro systémy s velmi krátkou vzdáleností mezi senzory, akorát pracoval s nižšími frekvencemi v rozpětí $4kHz$ až $45kHz$ a vzdálenost mezi senzory byla přes $100km$. V důsledku velkých vzdáleností mezi senzory bylo potřeba pro zjištění pozice bleskového výboje počítat i se zakřivením země. Výsledné polohy bleskových výbojů se při porovnání s úzkopásmovým DF měřením shodovaly.

Jako příklad takového systému lze uvést komerční systém pro detekce a sledování blesků (LPATS - Lightning Positioning and Tracking System) vyvinutý v 80. letech minulého století společností Atmospheric Scientific Corporation. Pracuje v LF a VLF frekvencích a skládá se alespoň ze 4 stanic, které jsou vzdáleny $200km$ až $400km$ a které jsou synchronizovány pomocí GPS. První verze nebyly schopny rozlišit IC a CG blesky nebo počet výbojů v jednom blesku. Novější verze jsou schopny rozlišit IC a CG blesky podle délky příchozí vlny - pulzy delší než $10\mu s$ jsou určeny jako CG blesky. Nejnovější systémy mají přesnost určení polohy pod $1km$.

3.3 Interferometrie

Blesk je mimo jiné zdrojem jakýchsi shluků elektromagnetických pulzů trvajících desítky až stovky mikrosekund. Lokalizace těchto shluků TOA metodami je velmi obtížná, protože TOA systém nedokáže přesně rozlišit a detekovat jednotlivé pulzy ve shluku. Toho lze docílit využitím interferenční metody. Princip této metody spočívá v tom, že není třeba rozlišovat jednotlivé pulzy, ale stačí porovnat fázový rozdíl změřeného signálu v úzkém frekvenčním rozsahu se signálem z různých senzorů. Vzdálenost mezi senzory je obvykle volena ve vhodných násobcích vlnové délky měřeného elektromagnetického záření. Nejjednodušší interferometr se skládá ze dvou antén, které jsou od sebe několik metrů. Každá anténa je připojena přes úzkofrekvenční filtr do přijímače signálu. Výstup ze dvou přijímačů je poslán do fázového detektoru, který je zdrojem napětí, které je úměrné fázovému rozdílu mezi dvěma změřenými signály. Určení polohy zdroje je obdobné jako pro velmi krátkou vzdálenost mezi TOA senzory. Časová diference mezi signály určuje rovinu, v níž leží zdroj. Pro určení azimutálního a elevačního úhlu je nutno použít alespoň tří měřících antén. Aby bylo možné určit pozici blesku, je třeba použít alespoň dva interferometry vzdálené od sebe řádově desítky km .

První interferometr pochází roku 1979. Od té doby bylo navrženo mnoho interferenčních systémů a metod detekce bleskových výbojů (viz [2]). Jedním z nich je např. komerční systém SAFIR (Surveillance et Alerte Foudre par Interférométrie Radioélectrique) odvozený z francouzského systému uvedeného v [2]. Skládá se obvykle ze tří interferometrických stanic, jejichž vzájemná vzdálenost je okolo

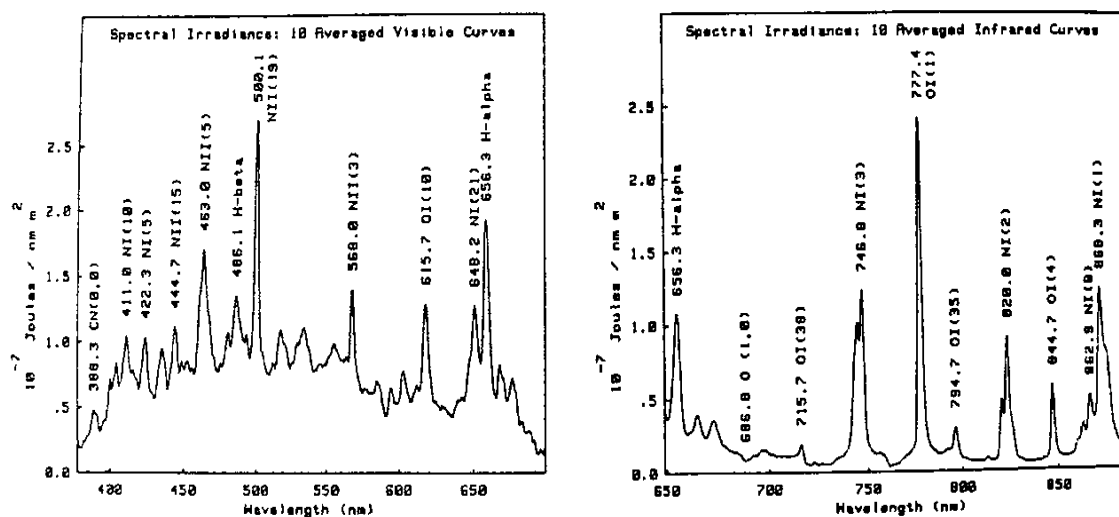
10km pro zjištění 3D pozice blesku nebo 100km pro určení polohy ve 2D. SA-FIR pracuje s frekvencemi 110 a 118MHz s frekvenční šířkou 1MHz. Navíc lze pro omezení vlivu rušivých elektromagnetických signálů měnit centrální frekvenci systému.

3.4 Optické metody

Detekce bleskových výbojů pomocí měření v oblasti viditelného spektra je podobná metodám zpracovávajícím elektromagnetické signály. Její nevýhodou je nutnost přímého "výhledu" směrem ke zdroji signálu. Pozemní optické stanice jsou limitovány okolním terénem, a pro větší vzdálenosti i zakřivením země. Možnosti satelitních měření jsou omezeny rozptylem světla v oblacích a celkovou dráhou detekovaného paprsku.

3.4.1 Optické vlastnosti blesků

Zdrojem záření v oblasti viditelného světla jsou elektrické výboje, a to převážně zpětný výboj při CG blesky (obr.3.6) nebo odražený výboj pro IC blesky. Při těchto výbojích dochází k ohmickému zahřívání ionizačního kanálu blesku až na 30000K. Při tomto zahřívání dochází k prudké excitaci elektronů v atomech a iontech ionizačního kanálu a následná rychlá deexcitace je silným zdrojem viditelného záření. Emisní spektrum plynu v ionizačním kanálu pro CG blesky je v obr. 3.5.



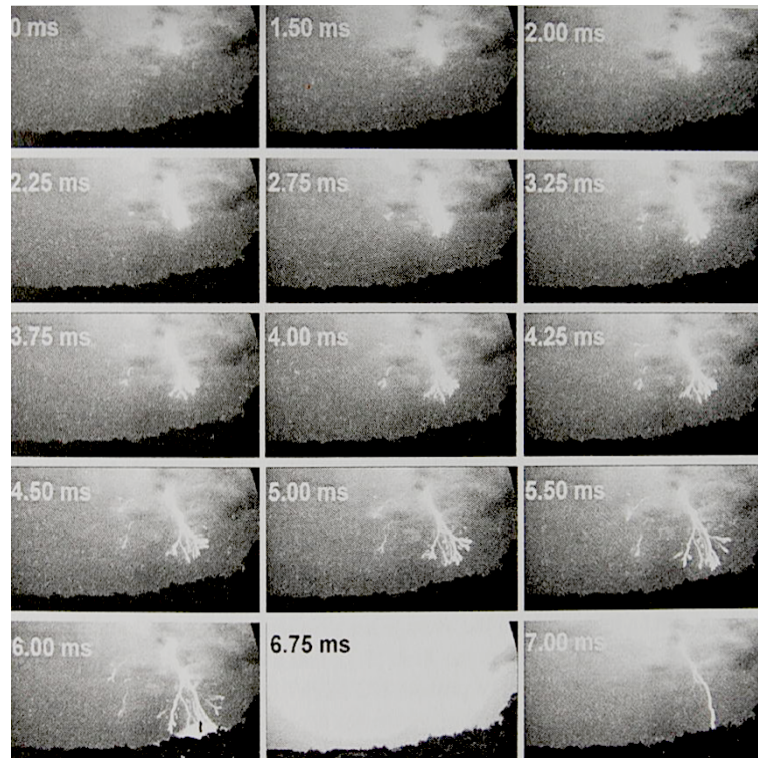
Obrázek 3.5: Emisní spektrum ve viditelné a části infračervené oblasti. Obrázek převzat z [1].

Nejvýraznější lokální maximum je pro kyslík OI(1) při 777,4nm. Mnoho detektorů používá filtry propouštějící záření právě na této vlnové délce.

3.4.2 Pozemní optické stanice

K určení azimutálního úhlu zdroje se používají fotoelektrické detektory nebo vysokorychlostní kamery. Pro určení polohy bleskového výboje je potřeba alespoň

dvou stanic, z jejichž dat lze triangulační metodou určit polohu blesku ([2]). Při použití vysokorychlostních kamer lze nejen měřit polohu blesku, ale i další vlastnosti jako počet výbojů během blesku, dobu trvání jednotlivých fází, počet ionizačních kanálů atd., a to s velkou přesností (viz obr. 3.6). Pro zjištění přesné doby výskytu blesku lze čas na kamerách synchronizovat přes GPS. Tím lze dosáhnout velmi přesného měření polohy, doby trvání a celkové charakteristiky blesku, které může sloužit jako referenční měření při porovnávání jiných detekčních systémů (např TOA, MFD apod., [1]).



Obrázek 3.6: Vybrané snímky z vysokorychlostní kamery pro CG- blesk. Snímky od $0ms$ až $6ms$ zachycují vůdčí výboj, v $6ms$ je patrný počátek zpětného výboje (výrazný nárůst vyzařované intenzity světla), který následuje na snímku $6.75ms$, poslední snímek $7ms$ zachycuje průběžný proud. Obrázek převzat z [1].

3.4.3 Satelitní detekce bleskových výbojů

Už na prvních satelitních snímcích Země byla jako vedlejší produkt snímkování zaznamenána místa s bleskovou aktivitou. První data z měření bleskových výbojů z fotografických snímků ze satelitu pochází z přelomu 70. a 80. let minulého století ([1]). Tím byl položen základ optické detekce blesků z oběžné dráhy Země.

Velikost a doba snímání dané oblasti závisí na výšce oběžné dráhy satelitu. Pro uvedení základních charakteristik optických detektorů na satelitech s nízkou oběžnou dráhou porovnáme senzory LIS (Lightning Imaging Sensor - senzor zobrazující blesky) a OTD (Optical Transient Detector - optický krátkodobý detektor). Tyto senzory se skládají z kamery s širokým úhlem záběru a oba jsou umístěny na satelitech NASA. Jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 3.4.3.

	OTD
Oběžná výška [<i>km</i>]	735
Inklinace oběžné dráhy [°]	70
Rozloha snímané oblasti [<i>km</i> ²]	1250 × 1250
Doba sledování daného bodu [<i>s</i>]	1 – 270
Počet pixelů CCD snímače	128 × 128
Oblast připadající na 1 pixel [<i>km</i>]	
Doba snímání 1 snímku [<i>ms</i>]	2
Provoz systému	květen 1995 - březen 2000
	LIS
Oběžná výška [<i>km</i>]	402
Inklinace oběžné dráhy [°]	35
Rozloha snímané oblasti [<i>km</i> ²]	670 × 670
Doba sledování daného bodu [<i>s</i>]	93
Počet pixelů CCD snímače	128 × 128
Oblast připadající na 1 pixel [<i>km</i>]	4 – 10
Doba snímání 1 snímku [<i>ms</i>]	2
Provoz systému	leden 1998 - současnost

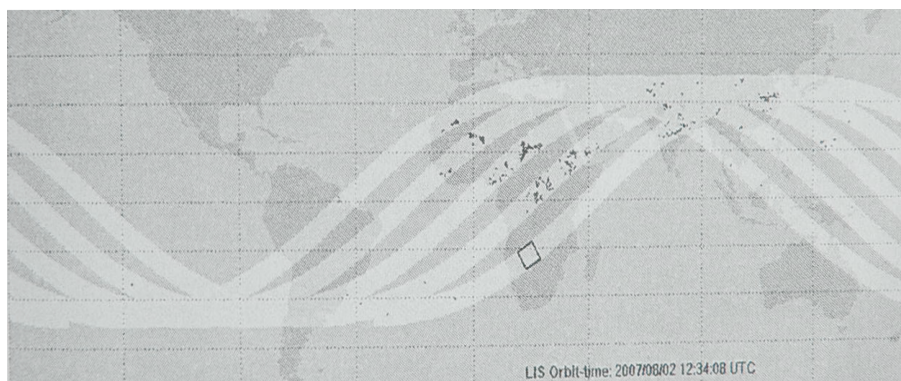
Tabulka 3.1: Parametry senzorů OTD a LIS. Hodnoty pro LIS jsou uvedeny po navýšení oběžné dráhy v srpnu 2001. Doba sledování daného bodu pro OTD závisí na naklonění satelitu. Data převzata z [1]

Na obr.3.7 je znázorněna oběžná dráha i s detekovanými blesky.

Důsledkem rozptylu viditelného záření uvnitř oblaku, vlastního prostorovému rozložení blesku, vzdálenosti blesku od horní hranice oblaku nebo výšce oběžné dráhy satelitu je, že z oběžné dráhy satelitu se blesk jeví jako oblast o průměru řádově 10*km*.

Další nevýhodou může být nemožnost rozlišení bleskových výbojů v důsledku vysokého záření pozadí způsobeného odrazem slunečního záření od oblaků. Během dne je obecně odražené záření mnohem jasnější než bleskový signál. Proto se pro eliminaci vlivu pozadí používají tři základní metody ([1]):

- Použití filtru s rozsahem 1*nm* a centrální hodnotou 777,4*nm*. V tomto rozsahu je soustředěno asi 6% vyzařované energie blesku, ale pouze 0,09% odraženého slunečního záření.



Obrázek 3.7: Oběžné dráhy satelitu nesoucí LIS detektor. Čtverec znázorňuje konkrétní polohu satelitu v čase 12:34:08 UTC 2.8. 2007, černé tečky jsou detekované bleskové výboje. Obrázek převzat z [1].

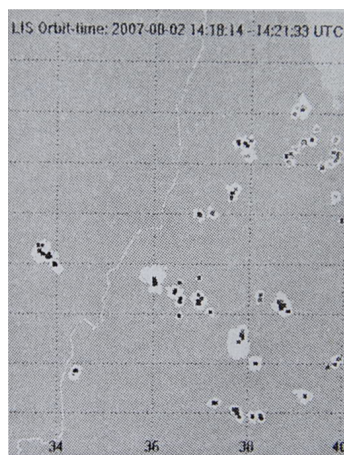
- Vhodnou volbou oblasti detekované jedním pixelem CCD snímáče a detekční dobou senzoru. Touto volbou lze zvýraznit zintenzivnění záření dané oblasti v důsledku krátkodobého bleskového výboje od průběžného záření pozadí.
- Průběžným průměrováním celkové odrazivosti v čase pro každý pixel detektoru lze s časem se pozvolna měnící odrazivosti pozadí detekovat krátkodobá zvýšení intenzity. Je-li toto zvýšení větší než vhodně zvolená mez intenzity (různá pro noc a den), je tato událost vyhodnocena jako bleskový výboj.

Některé hodnoty detekovaného záření převyšující danou mez nejsou bleskového původu. Tyto události mohou být způsobeny: natočením detektoru směrem ke Slunci, kdy detektor detekuje i vysokoenergetické sluneční částice; detekce vysokoenergetických částic z vesmíru; krátkodobý silný odraz slunečního záření (třpyt) v atmosféře; zesílení intenzity pozadí vlivem pohybu satelitu. Tyto jevy lze od bleskových výbojů odlišit díky jejich periodickému nebo naopak nahodilému charakteru (viz [1]). Bleskové výboje mají naopak tendenci k shlukování v prostoru i v čase.

Optické detektory detekují signál jak IC, tak i CG blesků, ale nerozlišují mezi nimi. Pro tento účel by bylo třeba vyvinout nové algoritmy na základě podrobné analýzy IC a CG signálů (například NBE pulzy, které jsou charakteristické pro IC blesky viz [1] a [2]). Výhodou satelitní detekce bleskových výbojů je, že není ovlivněna vlastnostmi zemského povrchu. Celková účinnost detekce bleskových výbojů (DE - detection efficiency) závisí na citlivosti senzorů a místním čase. Dle [1] je DE pro LIS 88% a pro OTD 54%, během dne ale kolísá až o 20%. Porovnáním LIS s pozemními systémy byla shoda v rozmezí 60 – 90% blesků ([1]) a přesnost určení polohy systémem LIS 3 – 6km. Na obr.3.8 je výsledný obraz detekce systémem LIS.

Detekce z geostacionárních družic

V současnosti nejsou geostacionární satelity vybaveny detektory bleskových výbojů. Další generace meteorologických geostacionárních satelitů GOES a METEOSAT ([1]) by jimi již měly být vybaveny.



Obrázek 3.8: Blesky detekované LIS nad Etiopií v 14:21:33 UTC 2.8. 2007, výsledná centrální pozice blesku je vybarvena. Obrázek převzat z [1].

Hlavní výhodou detekce z geostacionárních družic je spojitá řada měření pro danou polokouli, ostatní výhody a nevýhody jsou stejné jako pro jiné satelitní detektory. Vzhledem k velké vzdálenosti od Země vzrostou nároky na optické senzory a budou muset být navrženy a upraveny algoritmy pro zpracování signálů. Kombinace dat z geostacionárních a pozemních detektorů by znamenala další možnosti při sledování bleskových výbojů a jejich charakteristiky.

3.4.4 Satelitní systém zahrnující optickou a RF detekci

Příkladem takového systému je satelit nazývaný FORTE (Fast On-orbit Recording of Transient Events), který byl vypuštěn v dubnu 1997 a jeho oběžná dráha je ve výšce 800km s inklinací 70° . Součástí satelitu jsou 3 senzory:

Širokopásmové VHF přijímače (antény o délce 10m) s rozsahem 26 až 300MHz .

Pro detekci bleskových výbojů se používají frekvence 26 – 48MHz a 118 – 140MHz . Frekvence pod 20MHz jsou silně ovlivněny rozptylem signálu od ionosféry a šumem pozadí (vysílače apod.), a proto se nevyužívají. Aperturní úhel přijímače je 80°

Fotodioda pracující v rozsahu $400 - 1100\text{nm}$, která detekuje optické signály po dobu dle nastavení $1,92\text{ms}$ nebo $6,75\text{ms}$ s rozlišením $15\mu\text{s}$. Celková oblast detekce zaujímá oblast s průměrem 1200km .

CCD senzor s rozlišením 128×128 pixelů, na každý pixel připadá oblast zhruba $10 \times 10\text{km}^2$. Senzor je vybaven filtrem propustným pouze pro záření o vlnové délce $777,6\text{nm}$.

Satelit FORTE je využíván k detekci a výzkumu VHF signálu převážně z IC blesků a s nimi související NBE, primárně však neslouží k určování polohy blesku. Kombinací s ostatními systémy detekce blesků lze FORTE využít pro určení polohy i rozlišit mezi IC a CG blesky, jak je uvedeno v [1].

3.5 Schumannova resonance

Na Zemi je odhadovaný počet blesků dle [1] asi $50s^{-1}$. Elektromagnetické záření produkované bleskovými výboji v oblasti ELF $3Hz$ až $3kHz$ je nejvíce rozptýlováno a odráženo zemským povrchem a nižšími vrstvami ionosféry. V tomto frekvenčním rozsahu je záření jen velmi málo zeslabováno, mezi $5Hz$ až $60Hz$ je zeslabení nižší než $1dB/10^3km$ a tyto frekvence se nazývají Schumannovy rezonanční frekvence. ELF vlnění šířící se od zdroje (např. blesk) pak interferuje s již přítomným ELF vlněním v oblasti mezi zemským povrchem a ionosférou. Tomuto jevu se říká Schumannova resonance, kterou tento německý fyzik teoreticky předpověděl roku 1952. Charakteristické rezonanční frekvence ([1]) jsou $8Hz$ (vlnová délka záření je přibližně rovna průměru Země), $14Hz$, $20Hz$, $26Hz$ atd. Měřením vlastností Schumannovy resonance jako amplituda, frekvence a kvalitativní charakteristiky lze teoreticky z jediné měřící stanice získat globální charakteristiku bleskové činnosti. Pro tyto účely je však třeba upřesnit teorii šíření ELF vlnění od zdroje k místu pozorování a vhodně navrhnout měřící zařízení. Toto téma přesahuje rámec této práce a je blíže probráno v [1] a [2].

Stanice měřící Schumannovu resonanci se nacházejí po celém světě. Detekce pozice bleskového výboje je s přesností na $100km$ a účinnost detekce je ve srovnání s moderními systémy jen pár procent. Využití Schumannovy resonance spočívá především ve sledování klimatologických a globálních charakteristik bleskové činnosti.

3.6 Akustické a infrazvukové metody

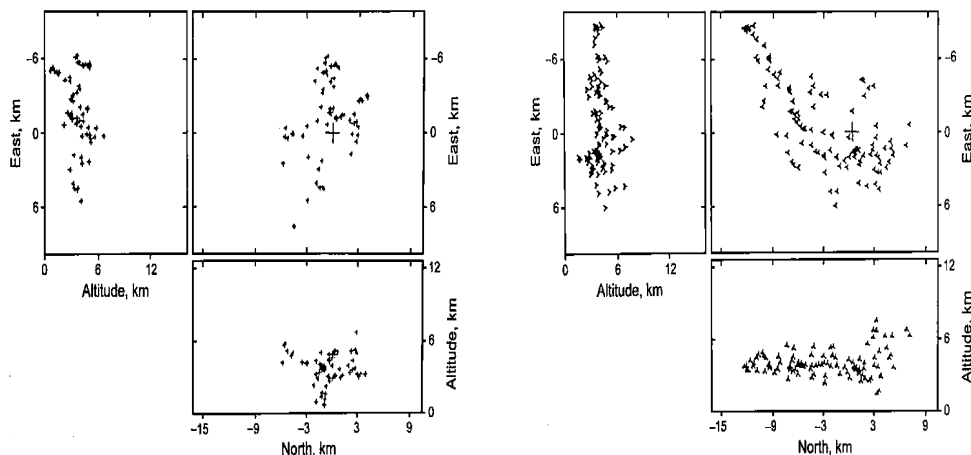
Princip těchto metod je obdobný jako pro TOA metody, ale místo elektromagnetického záření se detekuje záření akustické. Jestliže detekujeme danou charakteristiku signálu (např. charakteristické lokální maximum) na minimálně třech měřících stanicích (jako senzor se používá speciální mikrofon) a známe-li přesný čas detekce této charakteristiky na každé stanici, lze určit pozici a výšku zdroje. Používají se dvě akustické metody.

Stopování hromu (Ray Tracing) Tato metoda využívá mikrofony, které jsou od sebe vzdáleny několik metrů. Časový rozdíl mezi detekcí signálu na různých mikrofonech slouží k určení azimutálního úhlu zdroje a pozice zdroje je dopočítána v závislosti na daných atmosférických podmínkách a časovému rozdílu mezi časem detekce elektromagnetického a zvukového signálu. Malá vzdálenost mikrofonů zaručuje dobrou koherenci zvukového signálu.

Lokace hromu (Thunder Ranging) Při této metodě je vzdálenost mezi mikrofony řádově km . Časový rozdíl mezi časem detekce elektromagnetického signálu blesku a akustickou detekcí hromu tvoří kulovou plochu možného výskytu blesku. Pozice blesku je pak určena průsečíkem těchto kulových ploch ze tří různých stanic. Nevýhodou větší vzdálenosti mikrofonů je, že příchozí zvukový signál jeví známky inkoherece v důsledku různé délky a různých fyzikálních podmínek podél dráhy.

Stopování hromu je přesnější metoda než lokace hromu a navíc je schopná detekce více možných pozic zdroje během trvání hromu. Tyto metody využívají

mikrofony pro měření změn tlaku vzduchu. Proto je podstatné omezit a korigovat vliv šumového signálu, který rychle narůstá s rostoucí rychlostí větru.



Obrázek 3.9: CG (levá část) a IC (pravá část) blesky detekované metodou stopování hromu 25.7. 1972, 18:09:29 CG a 18:26:11 IC místního času. Obrázek převzat z [2].

Detekce infrazvukových vln se z meteorologického hlediska se využívá především k detekci jevů nazývaných skřítci (sprites), elfové (elves) nebo tryskové výboje (blue jets), které nejsou dosud podrobněji prozkoumány a jejich problematika je diskutována v [1], [2] nebo [16]. Detekce bleskových výbojů pomocí infrazvuku není v takovém středu zájmů jako výše zmíněné jevy. Stanice měřící infrazvukové signály je např. stanice St. Just v jihozápadní Francii popsané v [1]. Skládá se ze čtyř měřících čidel umístěných ve vrcholech a těžišti rovnostranného trojúhelníka o straně 1 km . Měřící čidlo se skládá z citlivého barometru (citlivost 10^{-3} Pa) s frekvenčním rozsahem $0,01 - 27\text{ Hz}$.

3.7 Radary

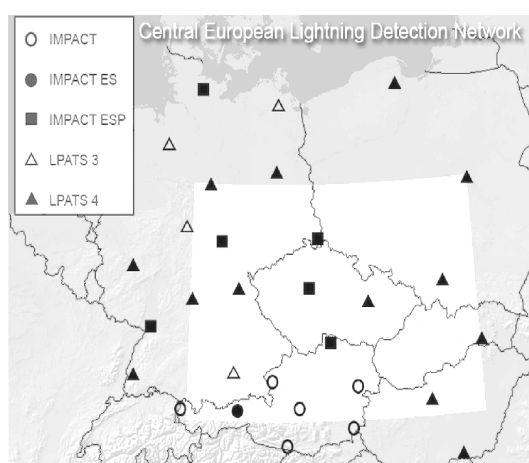
První práce zabývající se možností detekce bleskových výbojů pomocí radarů pochází z 50. let minulého století. Radarová měření umožňují detekovat blesk ve 3D, a to s dobrou přesností. Princip této metody vychází ze znalosti, že bleskový kanál má vysokou odrazivost rádiových vln s charakteristickou dobou trvání (řádově 100 ms), která velmi pravděpodobně souvisí s teplotou bleskového kanálu vyšší než 5000 K ([2]). Odrazivost klesá s postupným ochlazováním bleskového kanálu. Nevýhodou může být vysoká odrazivost vysílaného signálu od srážkové činnosti, čímž může dojít k zamezení odrazu signálu od bleskového kanálu. Volbou vlnové délky větší než 10 cm lze omezit odrazivost rádiového signálu na srážkách. Pro další zpřesnění by teoreticky bylo možné použít pro dané vlnové délky různé polarizační metody. Radarová detekce bleskových výbojů je schopna detekovat výboje vyzařující elektromagnetické záření pod detekční schopností interferometrické nebo TOA metody.

Síť radarových detektorů schopná relativně přesně detekovat bleskové výboje na dlouhé i krátké vzdálenosti v současné době neexistuje, přestože by teoreticky měla být po technické stránce zvládnutelná.

4. Detekční systémy v ČR

4.1 CELDN (Central Europe Lightning Detection Network)

Český hydrometeorologický ústav využívá data ze systému CELDN (od května 1999, od roku 2002 komerčně), který je součástí celoevropské sítě EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection). Síť CELDN vznikla propojením již existujících německých sítí BLIDS, rakouských ALDIS a instalací nových senzorů v České republice, Polsku, Maďarsku a Slovensku. Na obr. 4.1 je síť senzorů CELDN v roce 2002. Dle [5] roku 2005 začala postupná obnova starších senzorů



Obrázek 4.1: Síť senzorů systému CELDN ve Střední Evropě k roku 2002. Vyznačená oblast je zdrojem dat pro ČHMÚ. Obrázek převzat z [6].

IMPACT a LPATS 3,4 (LPATS je zmíněn v podkapitole 3.2.5) za novější senzory LS7000 od firmy Vaisala. Níže budou uvedeny některé vlastnosti vlastností senzorů Vaisala LS7000 a Vaisala IMPACT ESP převzaté z [9] a [10].

Senzor LS7000 pracuje na principu MDF a TOA metody s frekvenčním rozsahem v LF 1 – 350kHz, vzdálenost mezi senzory je 15 – 350km a čas je synchronizován přes GPS přijímač s přesností na 100nm. Senzor slouží především k detekci CG blesků, kde by měl mít minimálně 90% účinnost a přesnost lokace okolo 500m. Pro IC blesky je účinnost detekce mnohem nižší - 5 – 30%.

Senzor IMPACT ESP (Enhanced Sensitivity and Performance) využívá podobně jako LS7000 metody MDF a TOA s frekvenčním rozsahem 0,4 – 400kHz ([11]). Dosah senzorů se pohybuje v závislosti na nastavení 90 – 500km, maximální dosah činí 1000km a synchronizace času se děje opět přes GPS přijímač s přesností na 100nm. Účinnost detekce je odhadována pro CG blesky na 80 – 85%, pro IC blesky 30 – 50%. Senzory měří azimutální úhel zdroje signálu s chybou 0,5°, celková chyba systému je < 0,9°.

Senzor LPATS (Lightning Positioning and Tracking System) využívá metody TOA s frekvenčním rozsahem 2 – 500kHz. Dosah těchto senzorů je 200 – 300km ([11]).

Získaná data ze všech senzorů jsou v reálném čase posílány do centrálního serveru v německém Karlsruhe, kde jsou zpracovány a následně distribuovány uživatelům. Pro každý bleskový výboj jsou k dispozici informace o druhu blesku (IC nebo CG), poloze, času výskytu, odhadu velikosti a polaritě proudu. Celková účinnost detekce sítě CELDN je okolo 90% pro CG blesky a 30% IC blesky ([5]), i když např. v [11] je uvedeno, že síť EUCLID, a tedy i CELDN, má účinnost detekce přes 90% pro blesky s proudovou amplitudou $> 5kA$. Množství falešně detekovaných blesků je nízké. Rozlišení mezi CG a IC blesky se vyhodnocuje pro senzory LPATS a IMPACT-ESP z průběhu zaznamenané elektromagnetické vlny.

4.2 LINET (Lightning Location Network)

Roku 1994 začal na Mnichovské univerzitě vývoj VLF/LF senzoru k detekci blesků. Hlavní předností senzoru měla být vysoká účinnost detekce, a to zejména pro výboje produkující slabou změnu elektromagnetického pole. Data z takového senzoru pak měla sloužit pro sledování vzniku a průběhu bouřkových systémů. Navržený systém pak předčil očekávání, když svojí schopností detekce blesků s proudovou amplitudou v oblastech zejména pod $10kA$ (zejména IC blesky) výrazně přesáhl ostatní do té doby používané systémy. Tento systém využívá VLF/LF frekvence i pro detekci IC blesků, což znamenalo použití nových postupů při rozlišení mezi IC a CG blesky. Systém dostal označení LINET (Lightning Location Network) a první síť senzorů byla umístěna v okolí Mnichova. V současné době je používán nebo testován v Evropě, Jižní Americe, Austrálii nebo centrální Africe.

Každá stanice systému LINET se skládá ze dvou vertikálně umístěných, vzájemně ortogonálních kruhových smyček pro měření magnetického pole, GPS antény pro nastavení přesného času a PC pro zpracování a přenos změřených dat. Vzorkovací frekvence stanice je $1MHz$ a předpokládaná doba trvání bleskového pulzu je $512\mu s$. V tomto časovém rozsahu je překrytí dvou pulzů z různých blesků málo pravděpodobné a lze je rozlišit softwarově. Fourierovou analýzou signálu lze vyřadit hodnoty neodpovídající očekávanému průběhu a snížit tak vliv signálu jiného než bleskového původu. Rozlišení mezi IC a CG bleskem dle časové charakteristiky signálu se děje metodou založenou na trojrozměrné analýze TOA signálu. Tato metoda využívá toho, že zdroj VLF záření pro CG blesk se nachází blízko nad zemí, zatímco zdroj VLF záření IC při blesku lze uvažovat řádově km nad zemí. Dráha VLF signálu pro IC blesk je pak delší než u CG blesku, proto signál z IC blesku dorazí ke stanici později. Srovnáním TOA signálu z více stanic lze rozlišit mezi IC a CG blesky. Samotný senzor nerozlišuje mezi IC a CG blesky, ale změřený záznam dat posílá (zpravidla přes internetové spojení) do centrální stanice v Mnichově. V centrále jsou data dle daných algoritmů zpracována, z charakteristiky signálu určen typ blesku (IC nebo CG), a následně jsou již zpracovaná data určena k distribuci uživatelům sítě a zároveň uložena pro případné další studium.

K detekci blesku se používají alespoň 4 senzory, v oblastech se senzory vzájemně vzdálenými $200 - 250km$ alespoň 5 senzorů. Výsledkem je velmi vysoká přesnost lokace blesků. Pro CG blesky je přesnost určení místa úderu $\approx 150m$, čehož je dosaženo kombinací DF a TOA metody. Přesnost lokace IC blesků je $\approx 100m$. Účinnost detekce systému LINET se nedá přesně určit. Obecně se pro použité metody DF a TOA udává přesnost $60 - 90\%$. Při porovnání charakteristiky četností

blesků v závislosti na velikosti proudové amplitudy systému LINET s jinými systémy, systém LINET mnohonásobně převyšuje četností detekce jiné systémy v oblastech proudových amplitud nižších než $\approx 10kA$, v oblastech vyšších proudů se ale data již dobře shodují (údaje převzaty z [2]).

Evropská síť systému LINET vznikla 1.5. 2006 a v současnosti obsahuje okolo 90 senzorů (obr. 4.2). Cílem tohoto projektu je systém senzorů rozmístěných po celé Evropě vzájemně vzdálených 200–250km schopných trojrozměrného rozlišení IC a CG blesků.



Obrázek 4.2: Síť senzorů systému LINET v Evropě ke květnu 2008. Obrázek převzat z [1].

5. Porovnání systémů CELDN a LINET pro vybrané situace

Jak bylo již zmíněno v kapitole 4, účinnost detekce systému CELDN by měla být pro CG blesky okolo 90%, pro IC blesky v rozmezí 5 – 30%. Systém LINET by pak měl být mnohem citlivější v oblastech proudu nižších než $\approx 10kA$ s maximem detekovaných blesků kolem $\approx 5kA$ ([2]), pro větší proudy by měl mít srovnatelné hodnoty.

Pro porovnání byla použita data z 25.6. 2008, 3.7. 2008, 15.8. 2008. V každém z těchto dní byla k dispozici data ze systémů CELDN a LINET ze tří vybraných hodinových intervalů, v každém intervalu byly uvedeny souřadnice detekovaných blesků. Ke každému z uvedených dnů byly k dispozici proudové charakteristiky pro CG+/- a IC+/- blesky za celý den. Dále byla podrobněji zpracována situace z 15.8. 2010, která byla významná výskytem výrazné konvektivní oblačnosti v oblasti středních Čech doprovázené silným krupobitím, které způsobilo značné škody zejména v Praze a blízkém okolí. Tato data obsahovala informaci o pozici blesku, druhu blesku, proudové amplitudě i času výskytu. Z těchto dat bylo možné vykreslit zvlášť polohy pro IC+/- a CG+/- blesky, jejich proudovou amplitudu a časový vývoj. Dále byly zpracovány četnosti výskytu těchto blesků pro různé proudové amplitudy. Všechna graficky zpracovaná data jsou uvedena v příloze (obr.5.7 - 5.96), celkové počty detekovaných blesků z jednotlivých situací jsou uvedeny v tabulkách 5.1 a 5.2.

Tabulka 5.1: Počet detekovaných blesků v daném čase systémy LINET a CELDN

časový interval	CELDN	LINET	CELDN/LINET [%]
25.6. 2008 10-11 h	2187	13402	16,3
25.6. 2008 14-15 h	7311	29905	24,4
25.6. 2008 17-18 h	11561	42669	27,1
3.8. 2008 10-11 h	963	1704	56,5
3.8. 2008 15-16 h	12451	30661	40,6
3.8. 2008 20-21 h	8562	13283	64,5
15.8. 2008 1-2 h	2126	3455	61,5
15.8. 2008 2-3 h	3736	5790	64,5
15.8. 2008 3-4 h	6626	15847	41,8
15.8. 2010 15-22 h	6385	19852	32,2

Získaná data jsou již zpracována jednotlivými systémy. Způsob zpracování ani konkrétní hodnoty naměřeného signálu tedy nelze porovnat ani vyhodnotit - např. určit, jestli systém nevyhodnocuje rozsáhlejší bleskový výboj jako více samostatných blesků, jaká je minimální amplituda elektromagnetického pole pro vyhodnocení zdroje signálu jako bleskového výboje nebo způsob redukce rušivého signálu. Obdobně nelze porovnat citlivost jednotlivých senzorů. Z obr. 4.1 a 4.2 je patrné, že CELDN má relativně rovnoměrnou síť senzorů v oblasti České republiky, LINET má síť detektorů především pro východní část České republiky

Tabulka 5.2: Detekovaný počet IC+, IC-, CG+ a CG- blesků systémy LINET a CELDN

	CELDN	LINET	CELDN/LINET [%]
25.6. 2008			
CG-	45744	104031	44,0
CG+	17993	73715	24,4
IC-	13138	72803	18,0
IC+	16581	67764	24,5
3.8. 2008			
CG-	74492	113478	65,6
CG+	12471	58090	21,5
IC-	8974	38340	23,4
IC+	14526	46133	31,5
15.8. 2008			
CG-	127680	232918	54,8
CG+	28019	111307	25,2
IC-	7232	42869	16,9
IC+	22823	58950	38,7
15.8. 2010 15-22 h			
CG-	4813	8927	53,9
CG+	1178	5047	23,3
IC-	319	4070	7,8
IC+	75	5502	1,4

menší počet senzorů. Vliv hustoty sítě senzorů na přesnost detekce tedy také nelze ze získaných dat určit, stejně jako množství falešně vyhodnocených bleskových výbojů. Aby tedy bylo možné porovnat systémy CELDN a LINET, budeme předpokládat, že je nulové množství falešně vyhodnocených blesků (ve skutečnosti je dle [2] a [5] velmi nízké), detekční síť je pro oba systémy dostatečně hustá (dosah senzorů je přibližně 500km), systémy dokáží rozlišit rozsáhlý déle trvající blesk jako jeden výboj a ne jako shluk samostatných blesků a zanedbáváme i ostatní rušivé vlivy. Předpokládáme tedy, že systémy tedy detekují jen skutečně nastalé blesky. Získaná data z každého systému potom považují za skutečný blesk, který nastal v daném místě (chyba lokace řádově 100m je vzhledem k rozlehlosti porovnávaného území zanedbatelná) o dané proudové amplitudě. Systémy se potom liší jen počtem a pozicí detekovaných blesků. Vzhledem k proměnlivosti počtu a druhu blesků, která souvisí s konkrétním rozložením náboje v bouřkovém oblaku a okolních podmínkách a která bývá pro každou bouřku jiná, lze systémy přímo porovnávat pouze pro stejné situace.

Jako první bude diskutována situace z 15.8 2010, při které lze ze získaných dat nejlépe porovnat systémy CELDN a LINET.

15.8. 2010, příloha obr.5.46-5.96

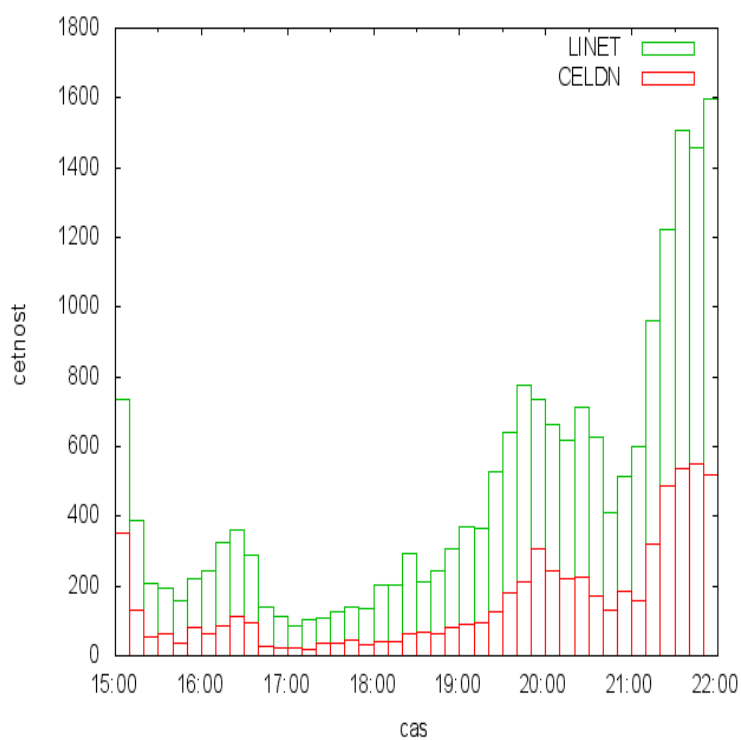
Z obr. 5.1 je patrný průběh bleskové aktivity. V oblastech poklesu počtu detekovaných blesků lze předpokládat i slábnutí tvorby bouřkových oblaků, a naopak při růstu bleskové aktivity předpokládat i nárůst bouřkové oblačnosti. Prudký nárůst blesků po 21:00 velmi pravděpodobně souvisí s bouřkovou činností nad Prahou a středními Čechami doprovázené silným krupobitím (příloha obr.5.53-5.59, 5.64-5.70, 5.75-5.81, 5.86-5.92). Jak je patrné z obr. 5.1 a 5.2, LINET detekoval po celé porovnávané období dvakrát až třikrát více blesků než CELDN.

Při detekci CG- blesků jsou nejmenší rozdíly mezi systémy CELDN a LINET, jak je patrné z obr. 5.3. Na tomto obrázku je vidět, že časový průběh maxim a minim si pro jednotlivé systémy odpovídá. Na obr. 5.93 v příloze je patrné, že LINET detekuje více CG- blesků v oblasti proudu pod $\approx 13\text{kA}$, nad touto oblastí jsou systémy srovnatelné, i když CELDN (viz obr.5.16,5.29 a 5.42 z přílohy) má pro vyšší proudy tendenci k vyššímu počtu detekovaných blesků.

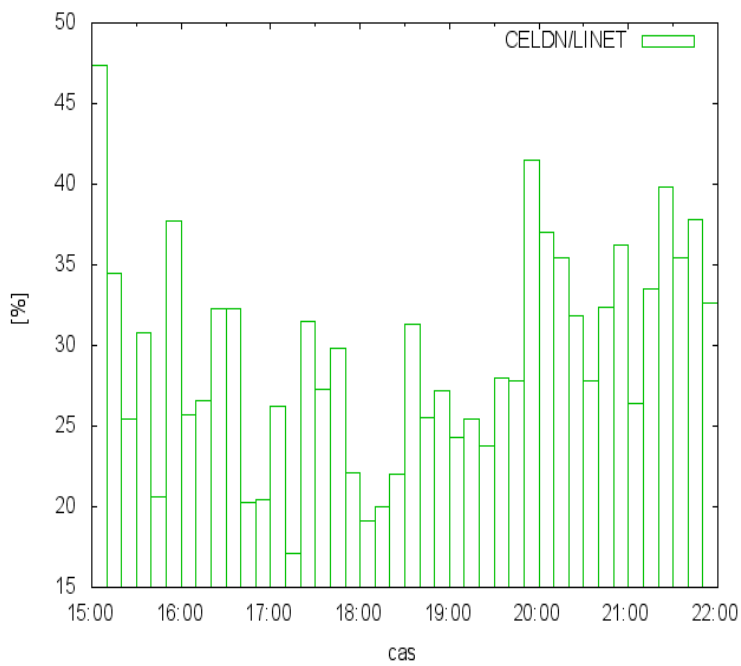
Obdobné vlastnosti jako pro CG- se dají přiřadit dle obr. 5.4, 5.17, 5.30, 5.43, 5.94 z přílohy i CG+ bleskům. Největší rozdíl mezi detekcí CG- a CG+ blesky je v počtu detekovaných CG+ blesků v oblastech pod $\approx 10\text{kA}$, kdy LINET přesahuje CELDN ještě výrazněji než při CG- blescích.

Pro IC- blesky je z obr.5.5 vidět, že se systémy v časovém průběhu detekce maxim a minim dobře shodují, ale v počtu detekovaných blesků LINET zhruba od 16:50 detekuje mnohonásobně více blesků, což by mohlo souviset s výskytem blesků nižších proudových amplitud. Na obr. 5.95 v příloze LINET detekuje opět mnohonásobně více pod $\approx 17\text{kA}$ a CELDN má zase tendenci k o něco většímu počtu detekovaných blesků pro vyšší proudy (příloha 5.18, 5.31 a 5.44).

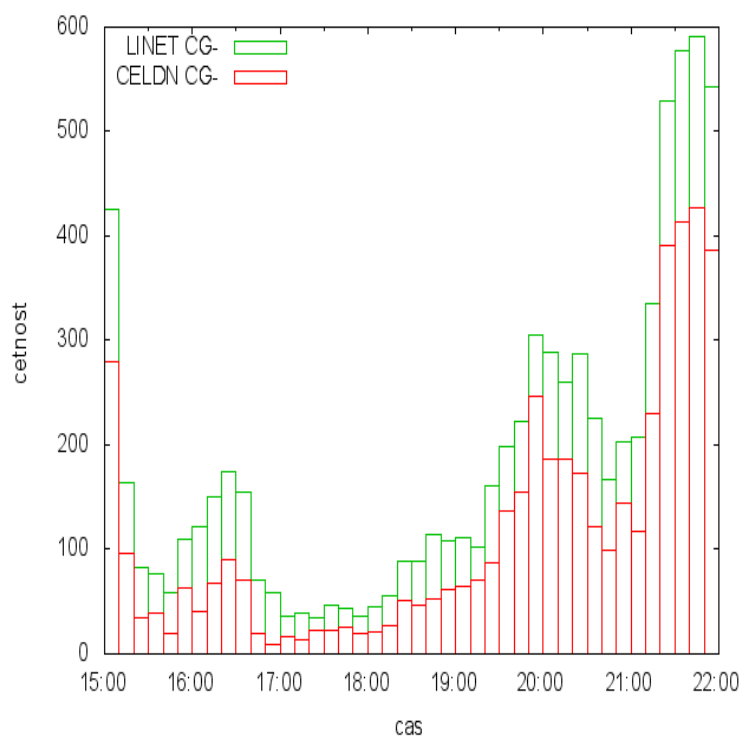
Pro IC+ blesky nastává vůbec největší rozdíl mezi systémy LINET a CELDN. Na obr. 5.6 je patrné, že CELDN detekoval minimální počet blesků (v rozmezí 15:10-21:10 po 1/10min), zatímco LINET detekoval množství srovnatelné s IC- blesky. Rozdíl je patrný i z obr.5.96 v příloze, kdy v celém proudovém rozsahu LINET výrazně převyšuje CELDN.



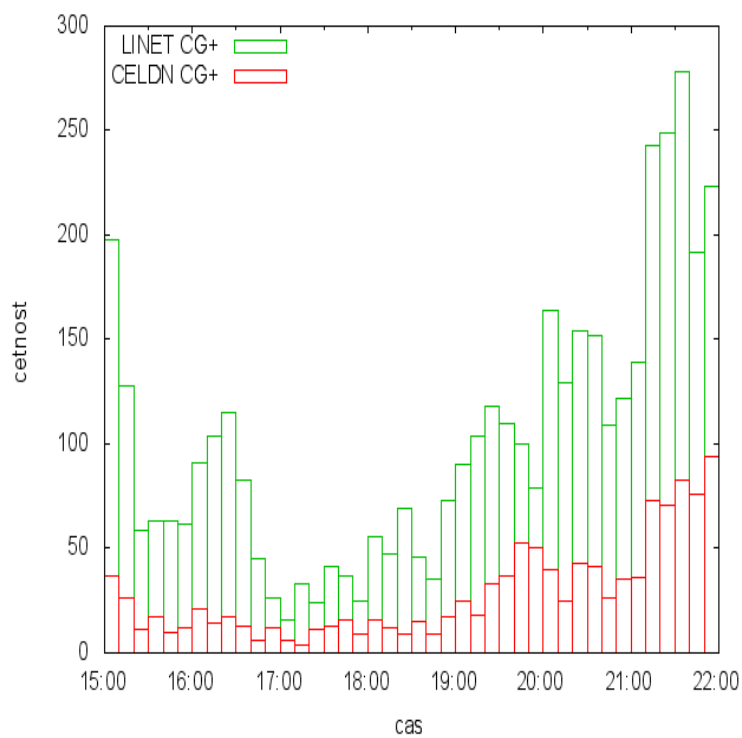
Obrázek 5.1: Časový průběh počtu detekovaných blesků 15.8. 2010.



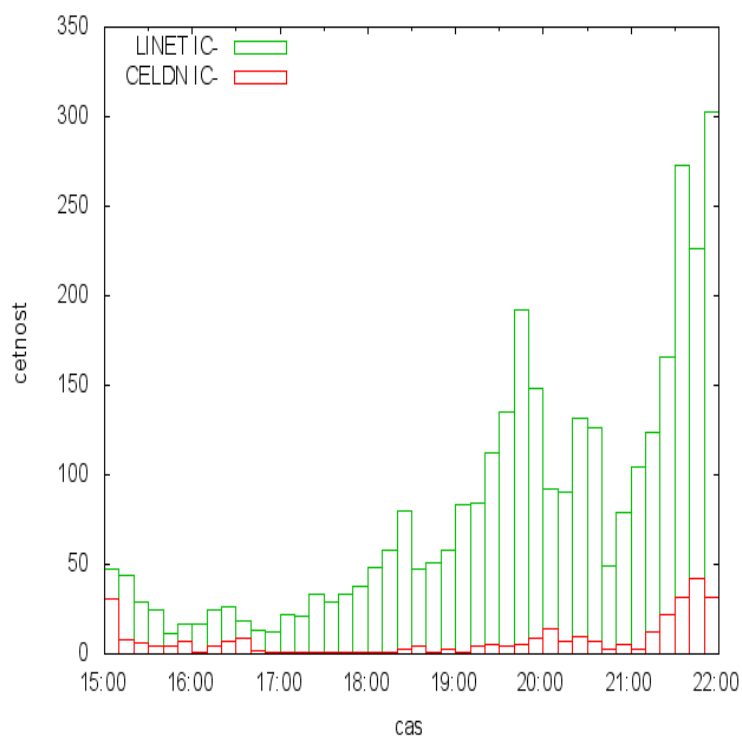
Obrázek 5.2: Časový průběh poměru počtu detekovaných blesků CELDN/LINET 15.8. 2010.



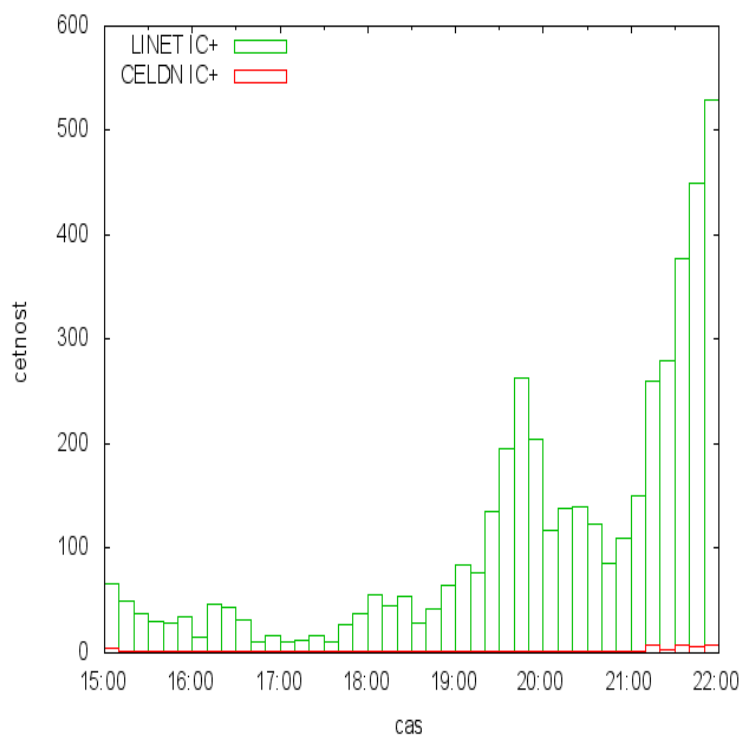
Obrázek 5.3: Časový průběh počtu detekovaných CG- blesků 15.8. 2010.



Obrázek 5.4: Časový průběh počtu detekovaných CG+ blesků 15.8. 2010.



Obrázek 5.5: Časový průběh počtu detekovaných IC- blesků 15.8. 2010.



Obrázek 5.6: Časový průběh počtu detekovaných IC+ blesků 15.8. 2010.

Nutno ale podotknout, že v porovnání s jinými situacemi je situace z 15.8.2010 charakteristická nižším počtem detekovaných IC blesků systémem CELDN vůči systému LINET, zejména pak pro IC+ (příloha, obr.5.95 a 5.96 s obr.5.18, 5.31, 5.44,5.19, 5.32 a 5.45).

Při porovnávání prostorového rozložení detekovaných blesků (příloha obr. 5.48) má systém CELDN tendenci detekovat více výbojů vyskytujících se samostatně mimo hlavní oblasti s bleskovou aktivitou (příloha obr. 5.46). LINET detekuje blesky převážně v centrech hlavní bouřkové aktivity (příloha obr. 5.47) a tyto oblasti se pak jeví značně kompaktně, výboje mimo hlavní bouřková centra nejsou tak časté jako pro CELDN. Porovnáním prostorového rozložení blesků s proudovou amplitudou (příloha obr. 5.53-5.59, 5.64-5.70, 5.75-5.81 a 5.86-5.92) bych se přikláněl k hypotéze, že systémem CELDN samostatně detekované blesky jsou CG blesky s převážně větší proudovou amplitudou než $\approx 10kA$. Tyto blesky by pak mohly odpovídat nepatrně zvýšeným hodnotám v četnostech blesků pro proudy vyšší než $\approx 10kA$ (příloha obr. 5.16, 5.17, 5.29, 5.30, 5.42, 5.43, 5.93 a 5.94). Tyto samostatné blesky by se mohly vyskytovat v kupovité oblačnosti, která není součástí výrazných bouřkových systémů. V takto osamocených kupovitých oblačích by pak existovala poměrně vyvinutá centra oblačné elektřiny, mezi kterými by nastal blesk s relativně velkou proudovou amplitudou, i když blesky se slabší proudovou amplitudou by se také mohly vyskytovat. Bleskem snížený náboj v oblačných centrech by pak vzhledem k nedostatečně silné konvekční činnosti dobíjející elektrický náboj v oblačných centrech nevytvořil dostatečně silné elektrické pole pro vytvoření dalších blesků. Tím by byl vznikala i časová izolovanost blesků. Samostatné IC blesky naopak detekuje spíše LINET. Tyto blesky mají tendenci spíše k vyšší proudové amplitudě (příloha obr. 5.18, 5.19, 5.31, 5.32, 5.44a 5.45, 5.95 a 5.96). Příčinu vzniku těchto blesků bych považoval za obdobnou jako pro CG blesky, důvod detekce těchto blesků systémem LINET bych přisuzoval jeho větší citlivosti k detekci IC blesků.

Přesné vysvětlení příčiny rozdílu mezi systémy CELDN a LINET neznám, bylo by k tomu potřeba podrobného studia celého systému - od přesnosti detektorů až pro algoritmy ke zpracování signálu. Uvedu zde ale své subjektivní názory, které bohužel nevycházejí z žádných konkrétních měření či podrobných analýz.

Systémy CELDN i LINET pracují s VLF/LF frekvencemi a oba využívají metody TOA a MDF, LINET je ale mnohem citlivější v oblastech pod proudovou amplitudou $\approx 10kA$. Vzhledem k tomu, že použité senzory se skládají z antén nebo kovových smyček pro měření magnetického pole a čas je synchronizován přes GPS, vliv nepřesností měření senzory považuji za minimální a rozdíl mezi systémy CELDN a LINET vzniká až při způsobu zpracování dat. LINET rozlišuje mezi CG a IC blesky pomocí 3D TOA metody (viz kap. 4), což je pravděpodobně výhodnější než dle značně proměnlivého tvaru elektromagnetické vlny jako CELDN. To ale nevysvětluje, proč LINET detekoval v porovnání se systémem CELDN i více CG blesků. Blesky o nízké proudové amplitudě (zhruba méně než $10kA$) vyzařují slabší elektromagnetické záření, které je velmi pravděpodobně výrazně "zašuměné" elektromagnetickým šumem. Aby byl LINET schopný přesně detekovat blesky s malou proudovou amplitudou kolem $\approx 5kA$, je potřeba omezit vliv tohoto šumu. LINET by pak mohl využívat vlastnosti shlukování bleskových výbojů v prostoru i v čase, takže by blesky, které jsou zdrojem slabšího signálu (s malou proudovou amplitudou), detekoval až při jejich

vícenásobném opakování v určitém prostoru a čase, díky čemuž by je dokázal rozlišit z okolního elektromagnetického šumu.

To by mohlo vysvětlit sníženou schopnost systému LINET detekovat izolovaně se vyskytující blesky, ale moc to nevysvětluje, proč LINET detekuje oproti systému CELDN méně samostatných CG blesků s vyšší proudovou amplitudou, respektive jestli i elektromagnetické záření z těchto blesků je výrazněji zašuměné a LINET je potřebuje ověřit vícenásobnou detekcí. Z obr.5.53-5.59, 5.64-5.70, 5.75-5.81 a 5.86-5.92 v příloze se tato domněnka tolik nepotvrdila, když LINET detekoval i samostatně se vyskytující blesky nízkých proudových amplitud, i když těchto blesků ale není mnoho. Schopnost systému CELDN detekovat více samostatných převážně CG blesků bych přisuzoval tomu, že CELDN oproti systému LINET není citlivý na blesky s nižší proudovou amplitudou ($\approx 5kA$). To by mělo klást nižší nároky na eliminaci elektromagnetického šumu, díky čemuž by CELDN nemusel signál z blesků tolik filtrovat z okolního šumu dle jejich prostorového a časového rozložení. To by mohlo vysvětlovat lepší schopnost detekce samostatně se vyskytujících blesků s tendencemi k vyšším proudovým amplitudám, které jsou zdrojem silnějšího elektromagnetického záření. To by mohlo vysvětlit vyšší počet detekovaných blesků systémem CELDN oproti systému LINET pro vyšší proudové amplitudy. Z obr. 5.53-5.59 a 5.64-5.70 v příloze je patrné, že CELDN detekuje samostatně se vyskytující blesky (především CG) s převážně vyšší proudovou amplitudou než $\approx 10kA$. Pro IC blesky je tato schopnost mnohem nižší (příloha, obr. 5.75-5.81 a 5.86-5.92), protože CELDN je mnohem méně citlivý na IC blesky v porovnání s jeho přesností pro CG blesky a ještě méně přesný při porovnání se systémem LINET, který tak díky své obecně vyšší detekční schopnosti IC blesků detekuje více samostatných výbojů. Přesto bych ale připomněl, že situace z 15.8. 2010 byla v porovnání s dalšími studovanými situacemi netypická nízkým počtem detekovaných IC blesků systémem CELDN (příloha, obr. 5.95, 5.96 v porovnání s obr.5.18, 5.19,5.31, 5.32, 5.44, 5.45).

Pro situace z 25.6. 2008, 3.7. 2008 a 15.8. 2008 uvedené v příloze na obr. 5.7 - 5.45 předpokládám obdobné charakteristiky a hypotézy způsobující odlišnosti systémů CELDN a LINET, jako jsou uvedeny pro situaci z 15.8. 2010. Pro jejich bližší ověření však nejsou k těmto situacím k dispozici data. Jak bylo uvedeno výše, systém CELDN má oproti systému LINET tendenci detekovat samostatné blesky, které mají větší časový odstup mezi jednotlivými blesky. Z obr. 5.9 - 5.15, 5.22 - 5.25 a 5.35 - 5.41 bych očekával, že tyto osamocené blesky mají výše zmíněné vlastnosti a vyskytují se v oblastech před přicházející hlavní oblastí bouřkové aktivity (velmi výrazně je toto pozorovatelné např. na obr. 5.12 oblast asi 50° s.š. a $13 - 14^\circ$ v.d.). V této oblasti bych očekával výraznější kupovitou oblačnost. Další možností je výskyt těchto blesků v oblastech po přechodu hlavní bouřkové oblačnosti (např. obr. 5.12 oblast asi $48,2 - 49^\circ$ s.š. a $12,5 - 14^\circ$ v.d.). V těchto místech předpokládám oblačnost s větším vertikálním vývojem ve fázi postupného rozpadu, která vznikla z rozpadu předešlých bouřkových buněk a může být doprovázená slabým deštěm. Situace z 15.8. 2008 je poněkud odlišná od ostatních situací, a to jednak četným výskytem blesků v brzkých ranních hodinách s jejich časovým nárůstem, tak i výraznou detekcí izolovaných blesků systémem CELDN. Získaná data jsou v rozmezí 1-4h ráno a z tabulky 5.1 je vidět, že blesková činnost ve sledovaném období narůstá. Z toho předpokládám, že se jedná o přechod výrazné studené fronty, na které se vyskytuje výrazná bouřková ob-

lačnost i rozsáhlá oblačnost s poměrně vyvinutým vertikálním vývojem, která by mohla být zdrojem izolovaných blesků. Systém CELDN detekoval velké množství samostatně se vyskytujících blesků, navíc v rozmezí proudu $2 - 3kA$ detekoval pro CG-, CG+ a IC+ (obr. 5.42, 5.43 a 5.45) více výbojů než LINET, i když v této proudové oblasti by měl být LINET přesnější. Jako příčina vzniku tohoto jevu mě napadá, že tyto blesky byly opět izolované, ale vhodně se vyskytující vzhledem k sensorům systému CELDN, který je i přes slabé proudové amplitudy mohl detekovat. Tato myšlenka mi ale nepřijde jako dostatečně pádný argument. Izolované blesky by mohly být tvořeny také blesky s vyšší proudovou amplitudou (očekával bych převážně CG blesky), čemuž by odpovídalo větší počtu detekcí systému CELDN pro vyšší proudové amplitudy.

Pro bližší porovnání by bylo třeba provést podrobnější analýzy dat (např. vybrat oblast menšího rozsahu a pro kratší časové intervaly vykreslit polohy, proudové amplitudy) a porovnat mnohem více různých situací. Zde provedené srovnání je spíše kvalitativního charakteru a vzhledem k vyhodnocování čtyř různých situací, z nichž jenom u jedné bylo k dispozici více dat pro přesnější porovnání, nelze přesně vyvozovat vlastnosti jednotlivých systémů. Porovnávaná data z hlediska četností blesků v závislosti na proudové amplitudě potvrdila předpoklady, že LINET je mnohem citlivější než CELDN pro proudové amplitudy nižší $\approx 10kA$ a maximum detekovaných blesků se nachází v okolí $\approx 5kA$. Maximum detekovaných blesků v pro CELDN je posunuto spíše k vyšším proudovým amplitudám a bývá několikrát nižší než maximum pro LINET. CELDN ale má tendenci detekovat nepatrně více blesků než LINET pro vyšší proudové amplitudy. Tyto hodnoty se ale mohou lišit podle konkrétní bouřkové situace. Z prostorového porovnání vyplývá, že LINET detekuje většinu blesků v hlavních oblastech bouřkové činnosti, blesky vyskytující se mimo tuto oblast detekuje LINET v porovnání se systémem CELDN méně a spíše se jedná o IC blesky. CELDN detekuje v oblastech hlavní bouřkové činnosti oproti systému LINET mnohem méně blesků, naopak má větší schopnost detekovat izolované blesky.

Závěr

V prvních třech kapitolách této práce jsou uvedeny základní poznatky o blescích a principy jejich detekce. Práce se dále zaměřuje na systémy CELDN a LINET, které zahrnují oblast České republiky. Oba systémy používají obdobné metody detekce bleskových výbojů. Rozdíl mezi systémy nastává až při zpracovávání dat, kdy CELDN rozlišuje CG a IC blesky pomocí tvaru příchozího signálu, zatímco LINET je rozlišuje pomocí 3D metody TOA. Velmi pravděpodobně vzniká hlavní rozdíl mezi systémy právě algoritmy pro zpracování signálu, i když toto nebylo v rámci práce ověřováno.

Z porovnání získaných dat od systémů CELDN a LINET jsem vyvodil následující poznatky. Systém CELDN je převážně určen k detekci CG blesků zejména proudových amplitud nad $\approx 10kA$. Tyto blesky je CELDN schopen detekovat i izolovaně v prostoru i v čase od hlavních oblastí bleskové aktivity, což je výhoda oproti systému LINET. Pro detekci IC blesků systémem CELDN předpokládám obdobné vlastnosti pouze s tím rozdílem, že CELDN má o něco nižší schopnost detekce IC blesků v porovnání se systémem LINET, což může být dáno způsobem rozlišení mezi IC a CG blesky. LINET je v porovnání se systémem CELDN mnohem citlivější v oblastech proudových amplitud pod $\approx 10kA$. Protože v této proudové oblasti se dle [1] velmi pravděpodobně vyskytuje převážná většina blesků, detekuje LINET v této oblasti většinou několikanásobně vyšší četnosti blesků a to jak CG, tak i IC. Proto má taky LINET mnohem větší celkový počet detekovaných blesků. V oblastech proudu nad $\approx 10kA$ jsou však oba systémy v počtu detekcí srovnatelné, dle mého osobního názoru je zde CELDN dokonce o něco přesnější.

Rozdíl mezi systémy nastane i při porovnání prostorového rozložení blesků. Při něm je patrné, že CELDN detekuje větší počet izolovaných blesků mimo hlavní centra bouřkové aktivity, zatímco LINET výrazně převyšuje CELDN v počtu detekovaných blesků v oblastech s hlavní bouřkovou aktivitou. Izolované blesky detekované systémem CELDN, dle mého názoru, mají tendence k vyšším proudovým amplitudám než $\approx 10kA$ a jsou tvořeny o něco častěji CG blesky než IC blesky, což by mohlo souviset s nižší schopností systému CELDN detekovat IC blesky. Tyto izolované blesky by pak mohly vysvětlovat nepatrně vyšší četnosti blesků detekovaných systémem CELDN pro proudové amplitudy nad $\approx 10kA$ v porovnání se systémem LINET. V centrech hlavní bleskové aktivity zase LINET převyšuje CELDN detekcí mnohanásobně vyššího počtu CG i IC blesků v proudových amplitudách pod $\approx 10kA$. Tyto blesky jsou mnohem více koncentrované v prostoru, i když i LINET detekoval izolované blesky. Tyto izolované blesky byly zhruba srovnatelné v počtu blesků s proudovou amplitudou pod a nad $\approx 10kA$, nepatrně více převažovaly IC blesky. Příčinu těchto vlastností předpokládám ve způsobech detekce blesků pomocí elektromagnetického záření a jeho rozlišení z elektromagnetického šumu okolí. Vysoká citlivost systému LINET na blesky slabé proudové amplitudy, a tedy i slabšího elektromagnetického signálu, klade velké nároky na eliminaci šumu. Aby bylo možné rozlišit tyto blesky z okolního šumu, musí je LINET rozlišit až při prostorovém a časovém vícenásobném opakování. To by z části vysvětlovalo vyšší detekci blesků v centrech a nižší počet izolovaně detekovaných blesků. Systém CELDN naopak není tak citlivý pro slabší bleskové signály, což neklade tak velké nároky na eliminaci šumu a umožnilo by to dete-

kovat i výboje, které se v prostoru a v čase neshlukují. Z toho se mi nabízí závěr, že CELDN lépe vystihuje prostorové rozložení blesků, což by mohlo být výhodné např. pro varování daných oblastí, naopak LINET lépe vystihuje celkovou bleskovou aktivitu v hlavních centrech bouřkové aktivity, což je výhodné pro studium bouřek, např. v souvislosti mezi počtem blesků a silou bouřky. Ideální detekční systém by pak mohl být kombinace systému CELDN a LINET, kdy CELDN by měřil blesky s proudovou amplitudou nad $\approx 10kA$ a LINET pod touto hodnotou.

Toto je však pouze hypotéza, která není doložena žádným výzkumem a která vychází pouze z pozorování zpracovaných dat. Navíc zpracovaná data obsahují pouze čtyři situace, což je malý počet na vyvození hlubších závěrů a vlastností. Tyto situace jsou navíc proměnlivé co do počtu různých typů blesků, což může být způsobeno nejen detekčními schopnostmi systémů, ale obecně vlastnostmi konkrétních bouřek. Pro bližší porovnání by bylo třeba podrobnějších analýz z prostorového i z časového měřítka, které by vycházely z větší datové základny. Pozice detekovaných blesků (převážně izolovaných) by bylo třeba porovnat s družicovými a radarovými záznamy pro ověření nebo vyvrácení uvedených hypotéz.

Seznam použité literatury

- [1] BETZ, H. D., SHUMANN, U., LAROCHE, P. *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. Springer Science+Business Media B.V. 2009. ISBN 978-1-4020-9078-3.
- [2] RAKOV, V. A., UMAN, M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2003. ISBN 0-521-58327-6.
- [3] BEDNÁŘ, J. *Pozoruhodné jevy v atmosféře*. Academia, 1989. ISBN 80-200-0054-2.
- [4] ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M. *Fyzika oblaků a srážek*. Academia, 2007. ISBN 978-200-1505-1.
- [5] NOVÁK, P., ŽELJDLÍK, T., TOLASZ, R. *Deset let využívání dat detekce blesků v českém hydrometeorologickém ústavu. Meteorologické zprávy*, 30. prosince 2009. ISSN 0026-1173.
- [6] NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H. *Climatology of lightning data in the Czech Republic. Atmospheric Research (2010)*.
doi: 10.1016/j.atmosres.2010.08.022.
- [7] *LINET - Lightning Location Network* [online]. cit. 2011-04-27.
Dostupné z WWW:
<http://www.pa.op.dlr.de/linet/index.html>
- [8] *EUCLID EUropean Cooperation for LIghtning Detection* [online]. cit. 2011-04-26.
Dostupné z WWW:
<http://www.euclid.org/>
- [9] *Vaisala Thunderstorm CG Enhanced Lightning Sensor LS7000 technická dokumentace* [online]. cit. 2011-04-28.
Dostupné z WWW:
<http://www.hobeco.net/pdf/LS7000.pdf>
- [10] *Vaisala IMPACT ESPTM technická dokumentace* [online]. cit. 2011-04-28.
Dostupné z WWW:
http://www.hobeco.net/pdf/IMPACTESP_B210324en-A.pdf
- [11] FINKE, U., KREYER, O. *Detect and Locate Lightning Events from Geostationary Satellite Observations* [online]. cit. 2011-04-12.
Dostupné z WWW:
http://www.eumetsat.int/groups/pps/documents/document/pdf_mtg_rep05.pdf
- [12] SCHULZ, W., LOJOU, J. Y. *Total Lightning Detection Network in Central Europe: The F.L.A.S.H. Project* [online]. cit. 2011-04-28.
Dostupné z WWW:

http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Scientific%20papers/Total_lightning_network_in_central_Europe__The_FLASH_Project.pdf

- [13] LE VINE, D. M., KRIDER E. P., WIEDMAN C. D. *RF Radiation Produced by Intracloud Lightning Discharges* [online]. cit. 2011-04-10.
Dostupné z WWW:
http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19790014537_1979014537.pdf
- [14] LE VINE, D. M. *Review of Measurements of the RF Spectrum of Radiation from Lightning* [online]. cit. 2011-03-28.
Dostupné z WWW:
http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870001225_1987001225.pdf
- [15] BLANC, E. *The Infrasound Monitoring System for The CTBT Control* [online]. cit. 2011-04-15.
Dostupné z WWW:
<http://www.ctbtcommission.org/blancpaper.htm>
- [16] *Sprites, Jets and Elves* [online]. cit. 2011-04-12.
Dostupné z WWW:
<http://www.albany.edu/faculty/rgk/atm101/sprite.htm>
- [17] LYNN, A. *Electric Field Mill home page* [online]. cit. 2011-04-16.
Dostupné z WWW:
<http://a-tech.net/ElectricFieldMill/index.html>
- [18] *Benjamin Franklin - Wikipedie* [online]. cit. 2011-05-12.
Dostupné z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Franklin

Seznam tabulek

3.1	Parametry senzorů OTD a LIS	29
5.1	Celkový počet detekovaných blesků	38
5.2	Detekované IC+, IC-, CG+ a CG- blesky	39

Použité zkratky

CG - Cloud to Ground - blesk mezi oblakem a zemí

IC - Intra Cloud - označení pro blesk, který neudeří do země

+/- - znaménko určující polaritu proudu při blesku

ELF - Extremely Low Frequency - extrémně nízká frekvence

VLF - Very Low Frequency - velmi nízká frekvence

LF - Low Frequency - nízká frekvence

MF - Medium Frequency - střední frekvence

HF - High Frequency - vysoká frekvence

VHF - Very High Frequency - velmi vysoká frekvence

UHF - Ultra High Frequency - ultra vysoká frekvence

NBP/NBE - Narrow Bipolar Pulses nebo Events - změna polarity elektrického pole související s oblačnými výboji

MDF - Magnetic Direction Finding - určení směru zdroje magnetického pole

DF - Direction Finding - dvě vzájemně ortogonální vodivé smyčky

NS - North South - směr ze severu na jih

WE - West East - směr ze západu na východ

3D - trojrozměrný prostor

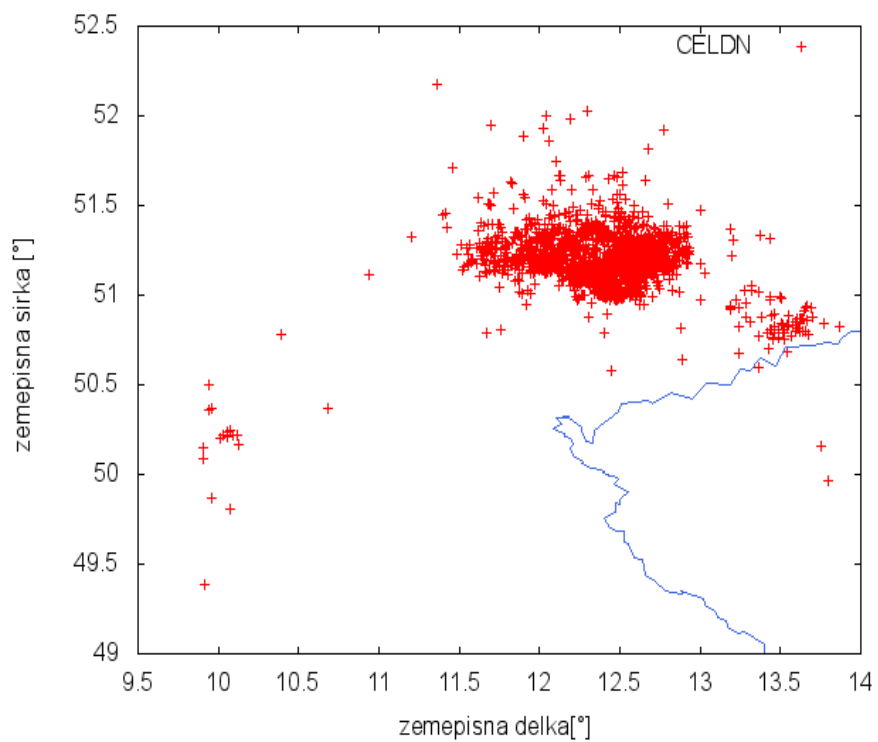
2D - dvourozměrný prostor

DE - Detection Efficiency - účinnost detekce bleskových výbojů

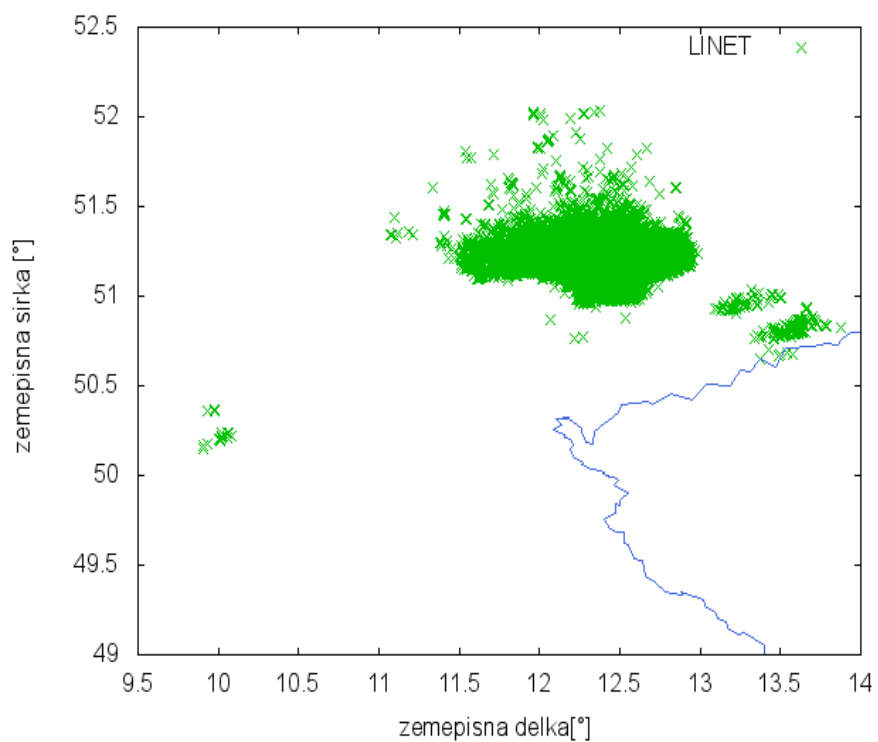
s.š. - severní šířky

v.d. - východní délky

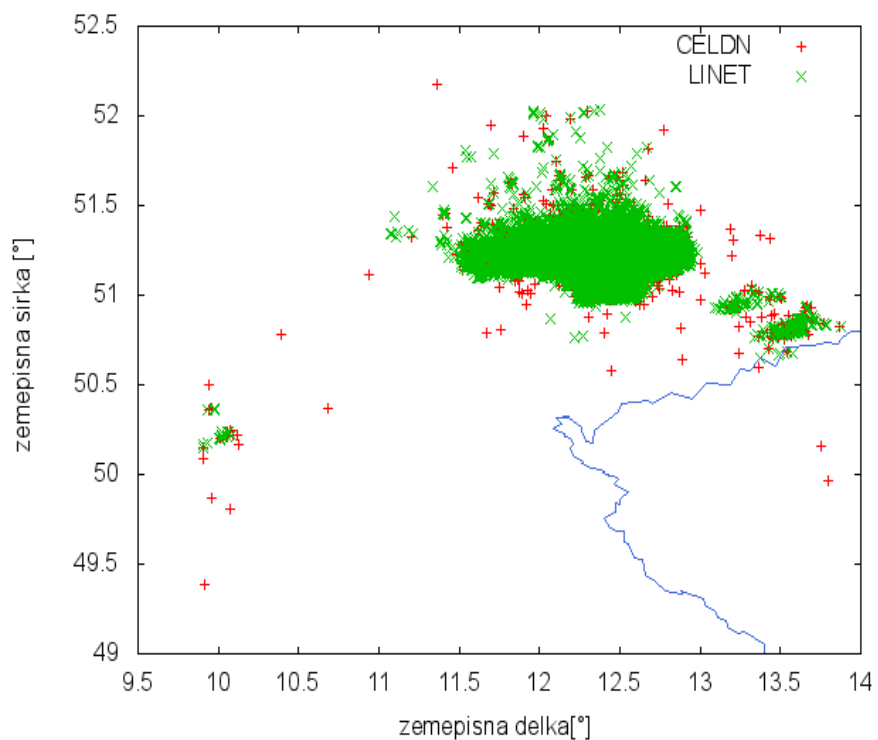
Přílohy



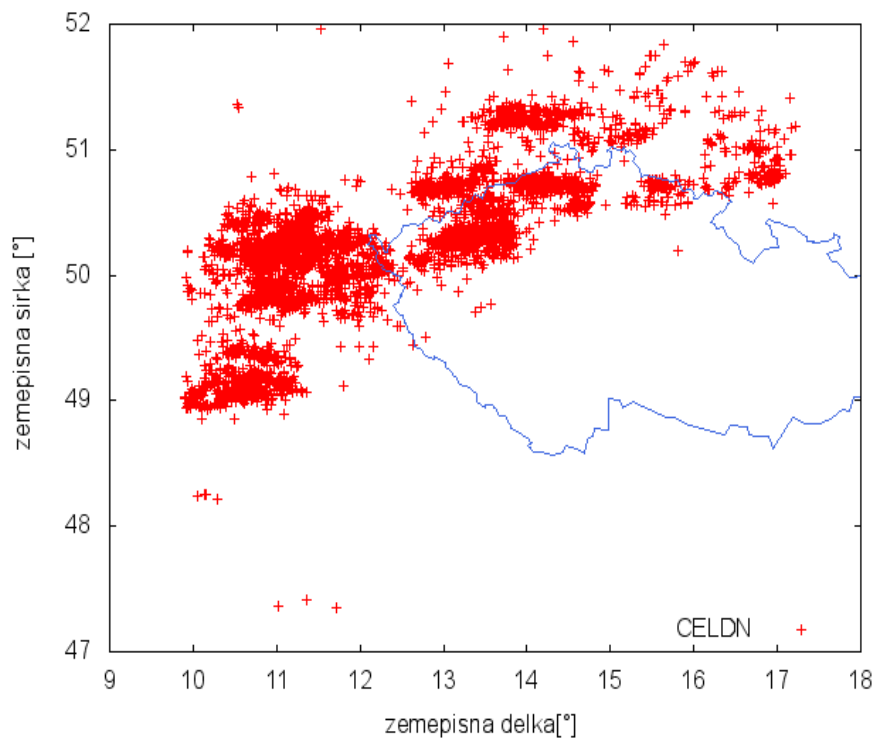
Obrázek 5.7: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 25.6. 2008 v rozmezí 10-11h místního času.



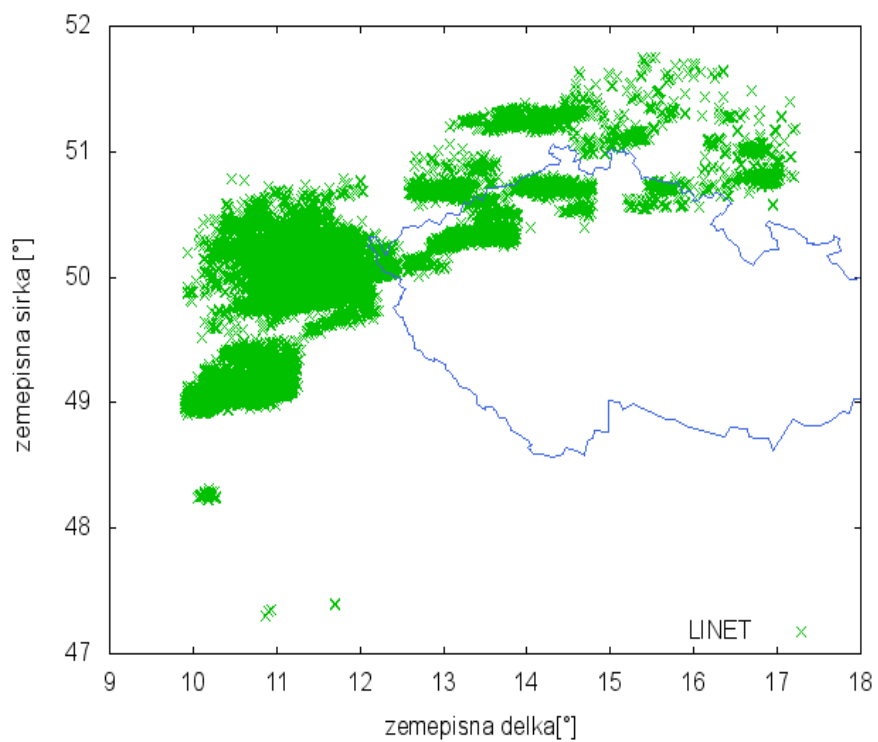
Obrázek 5.8: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 25.6. 2008 v rozmezí 10-11h místního času.



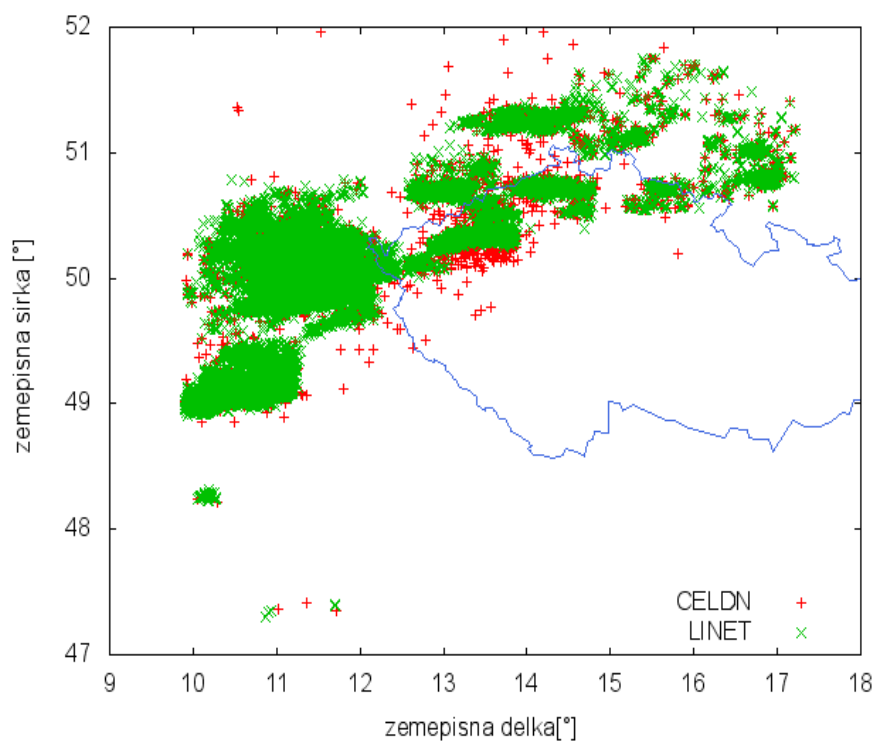
Obrázek 5.9: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 25.6. 2008 v rozmezí 10-11h místního času.



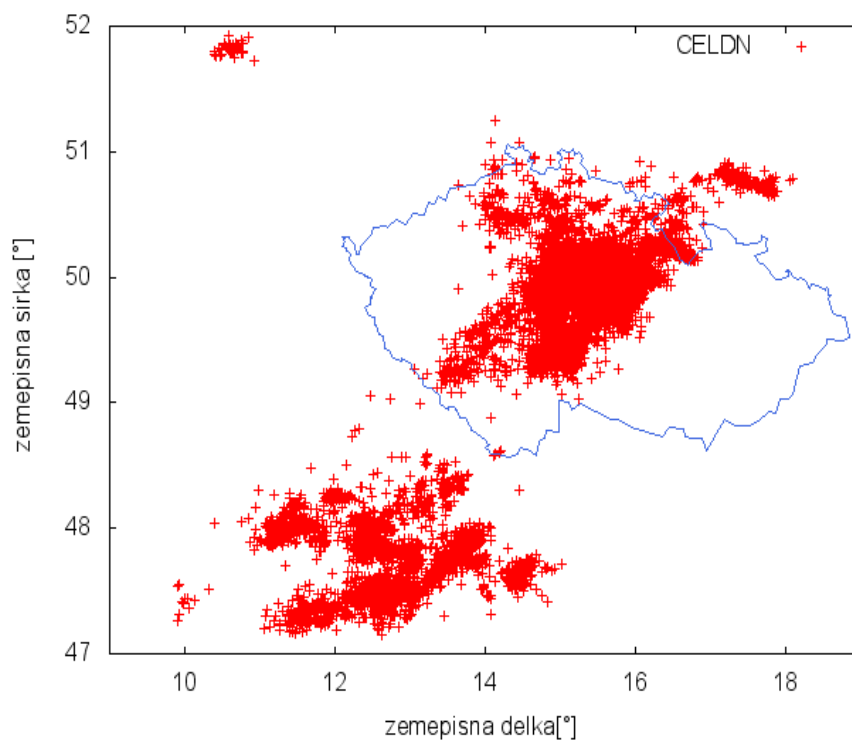
Obrázek 5.10: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 25.6. 2008 v rozmezí 14-15h místního času.



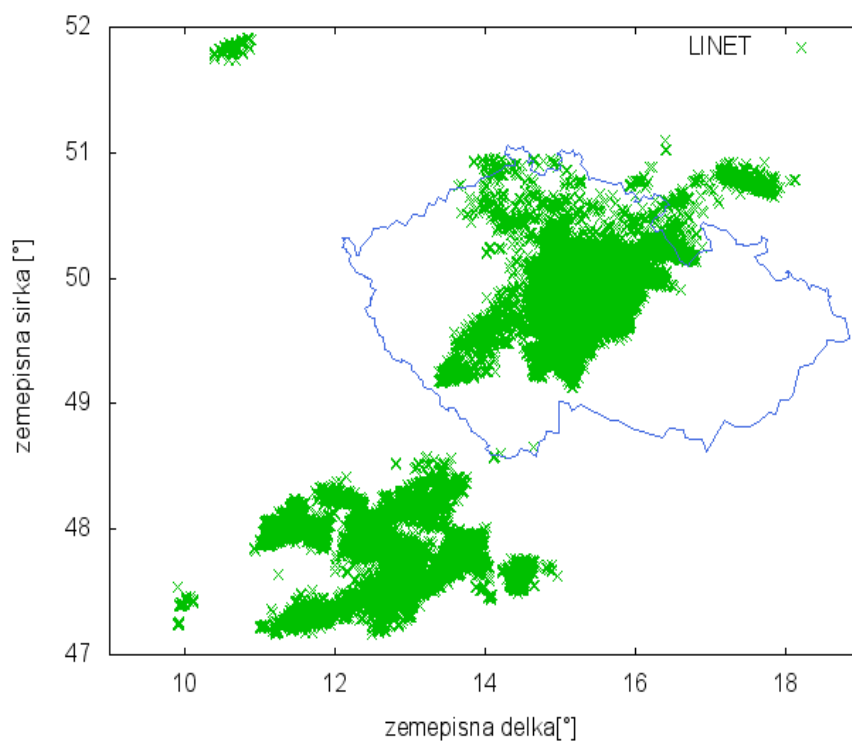
Obrázek 5.11: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 25.6. 2008 v rozmezí 14-15h místního času.



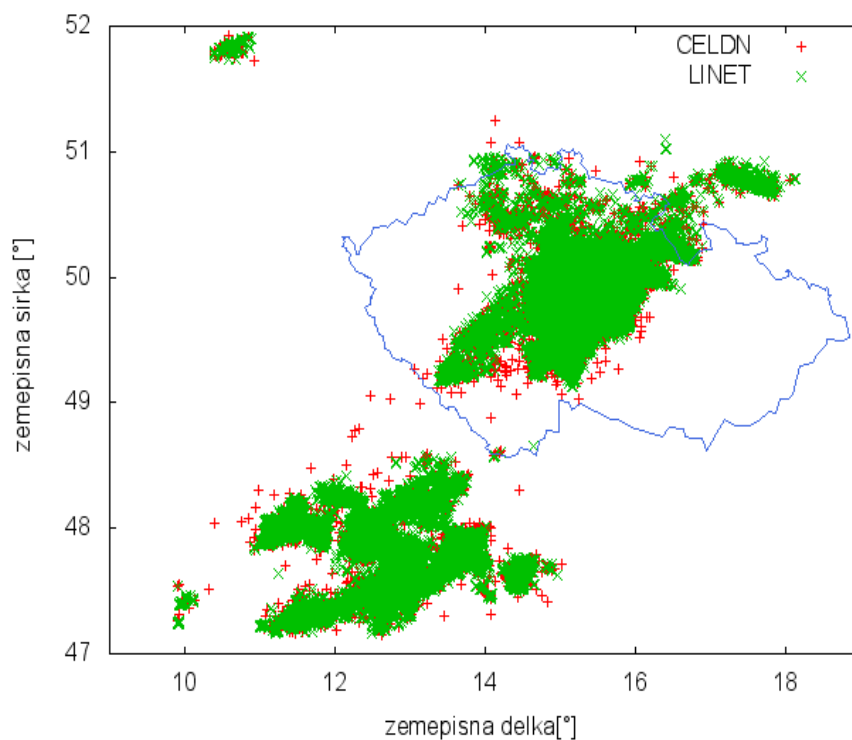
Obrázek 5.12: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 25.6. 2008 v rozmezí 14-15h místního času.



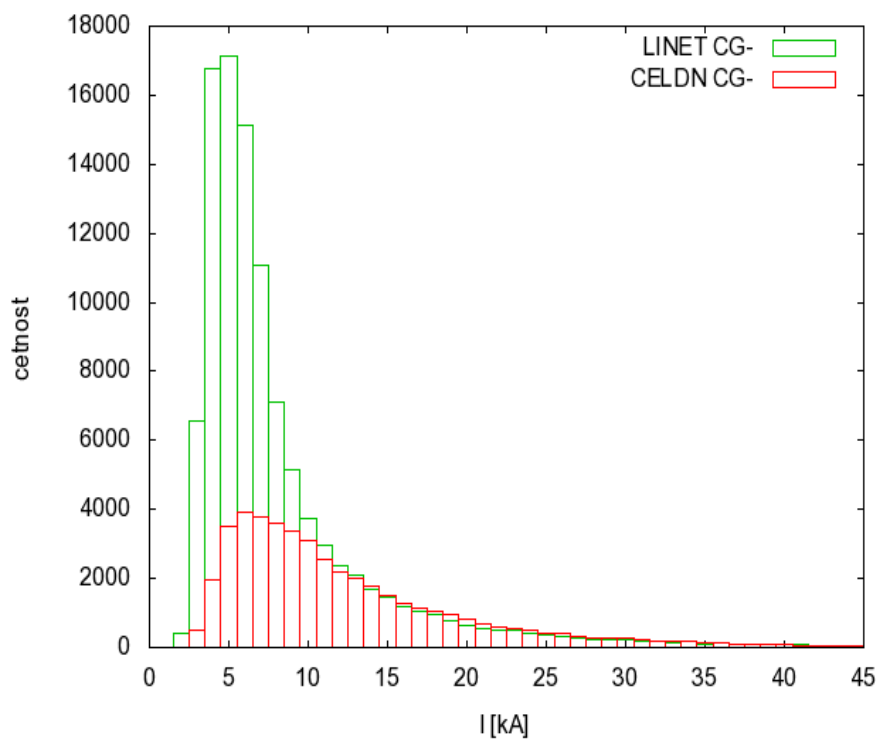
Obrázek 5.13: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 25.6. 2008 v rozmezí 17-18h místního času.



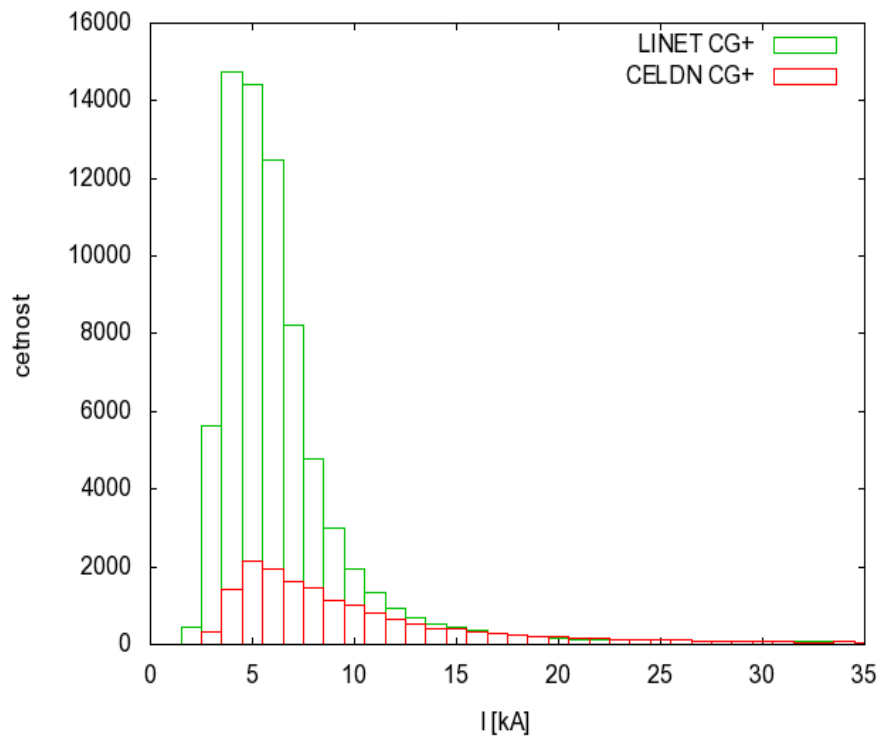
Obrázek 5.14: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 25.6. 2008 v rozmezí 17-18h místního času.



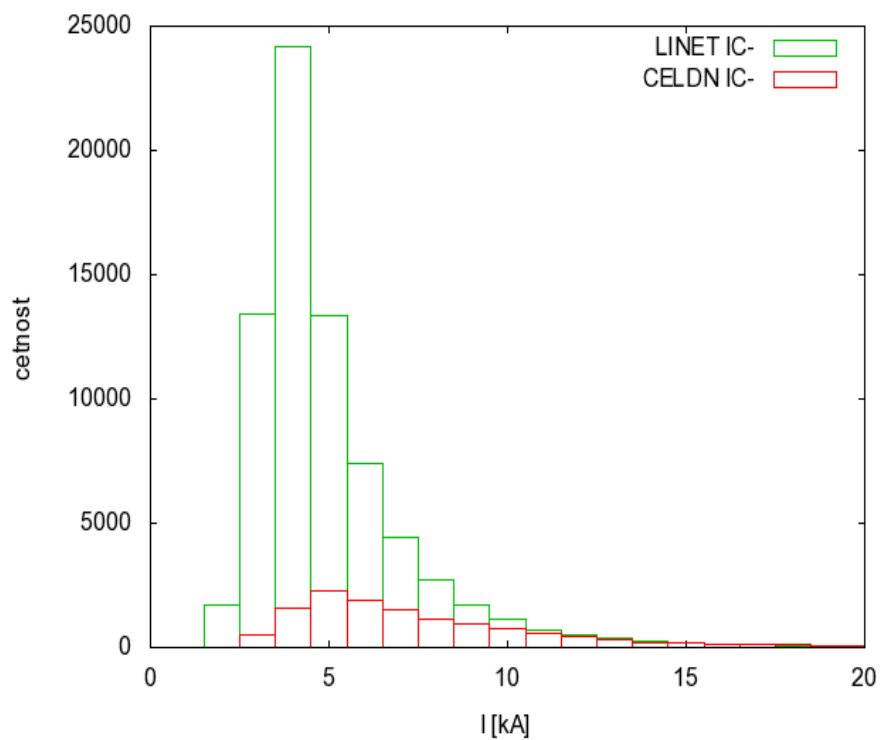
Obrázek 5.15: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 25.6. 2008 v rozmezí 17-18h místního času.



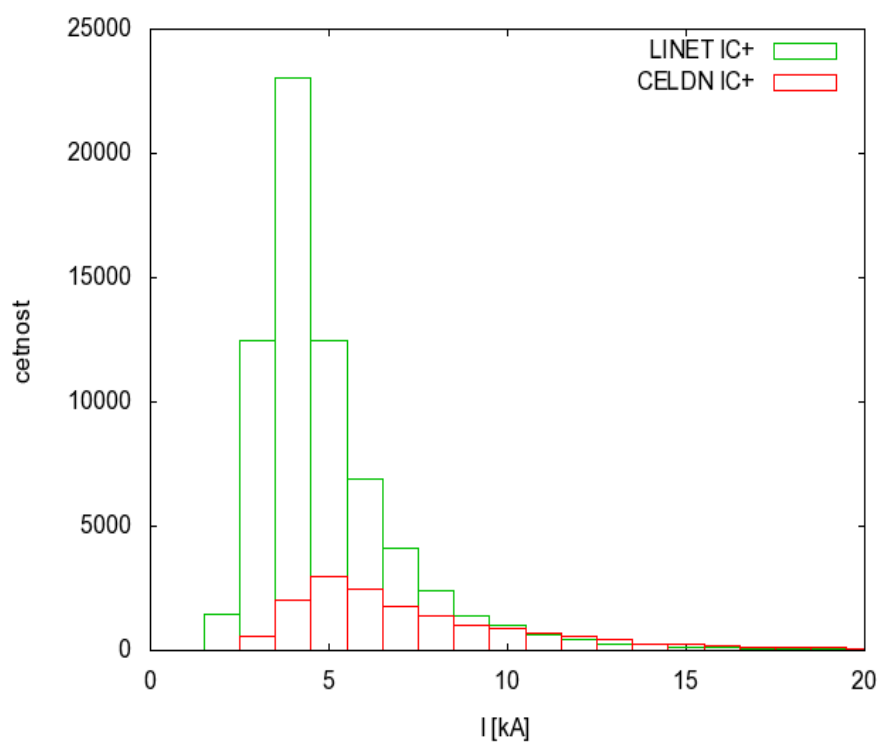
Obrázek 5.16: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG- blesků pro systémy CELDN a LINET 25.6. 2008.



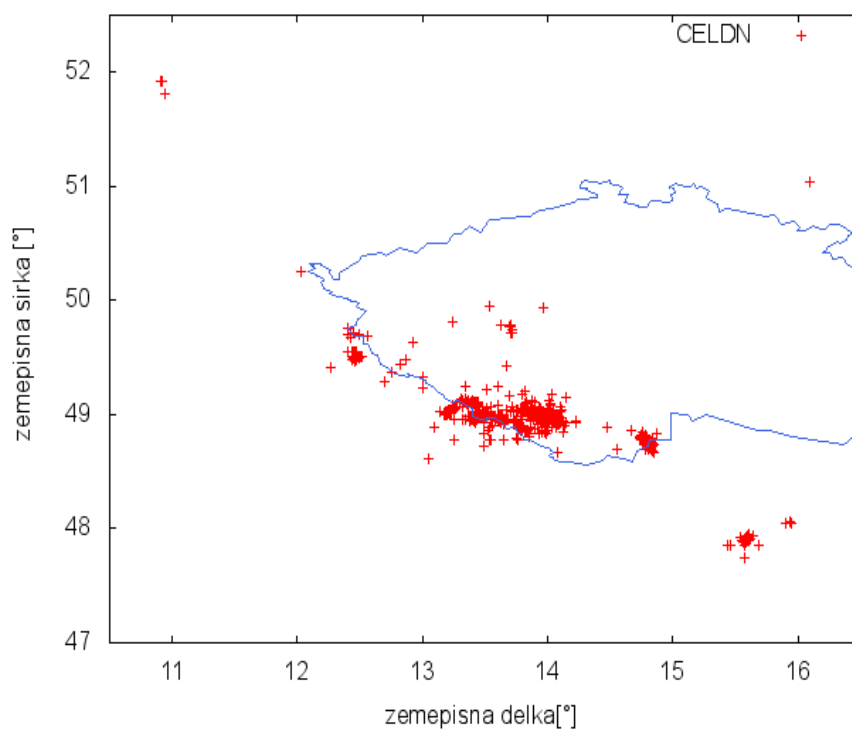
Obrázek 5.17: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG+ blesků pro systémy CELDN a LINET 25.6. 2008.



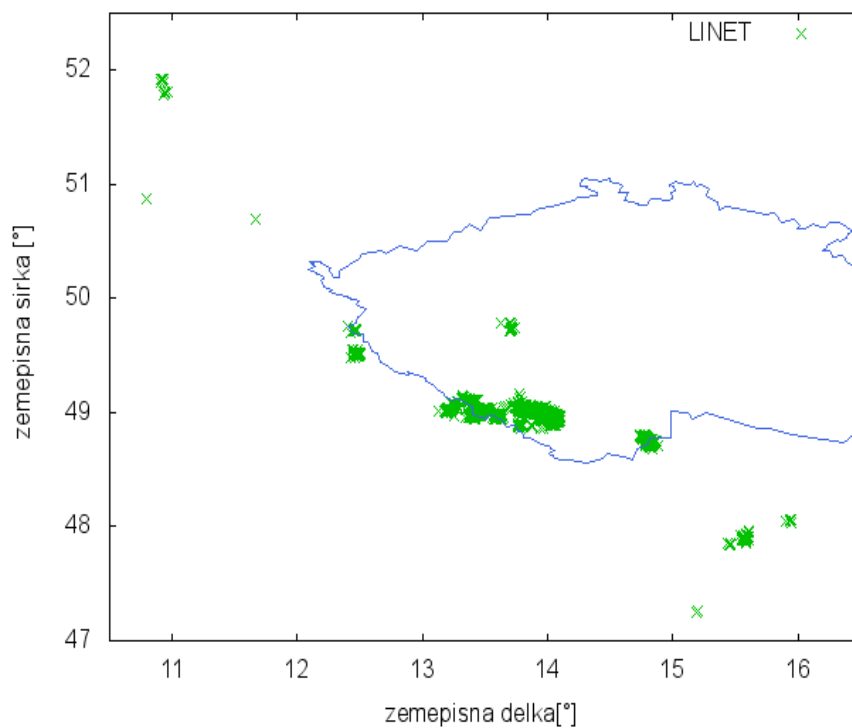
Obrázek 5.18: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC- blesků pro systémy CELDN a LINET 25.6. 2008.



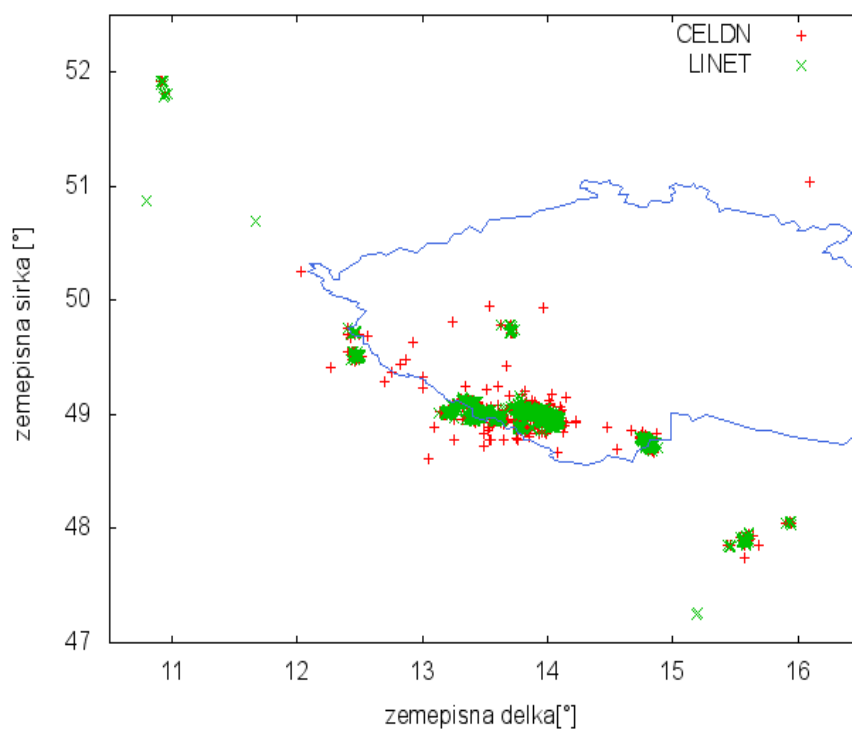
Obrázek 5.19: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC+ blesků pro systémy CELDN a LINET 25.6. 2008.



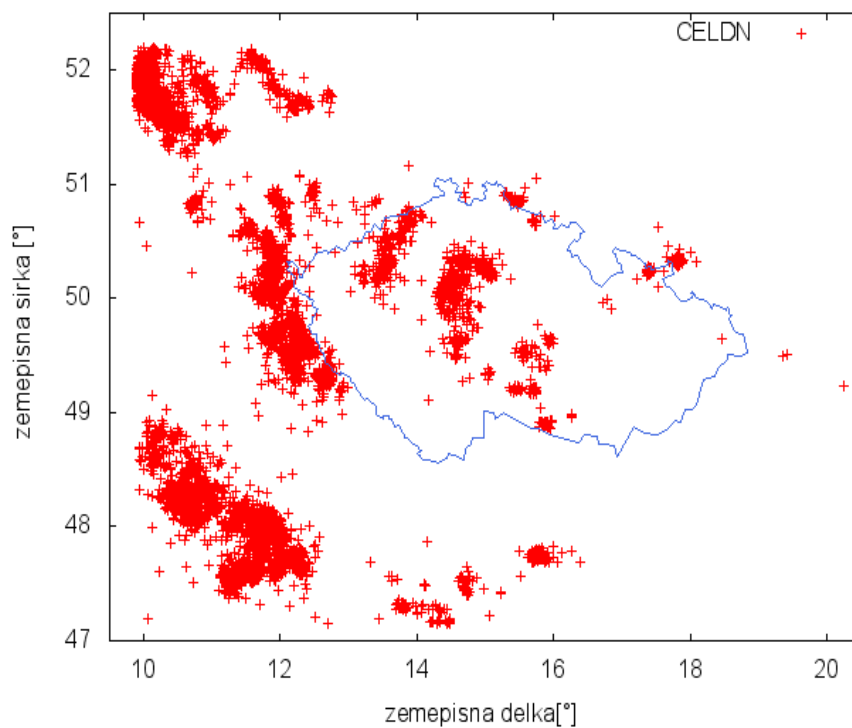
Obrázek 5.20: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 3.7. 2008 v rozmezí 10-11h místního času.



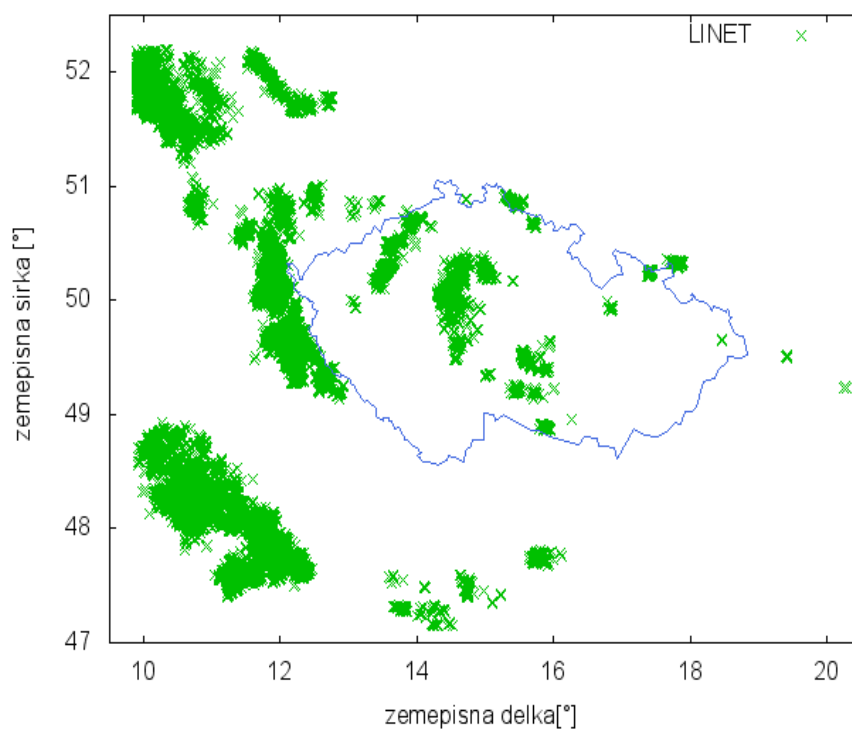
Obrázek 5.21: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 3.7. 2008 v rozmezí 10-11h místního času.



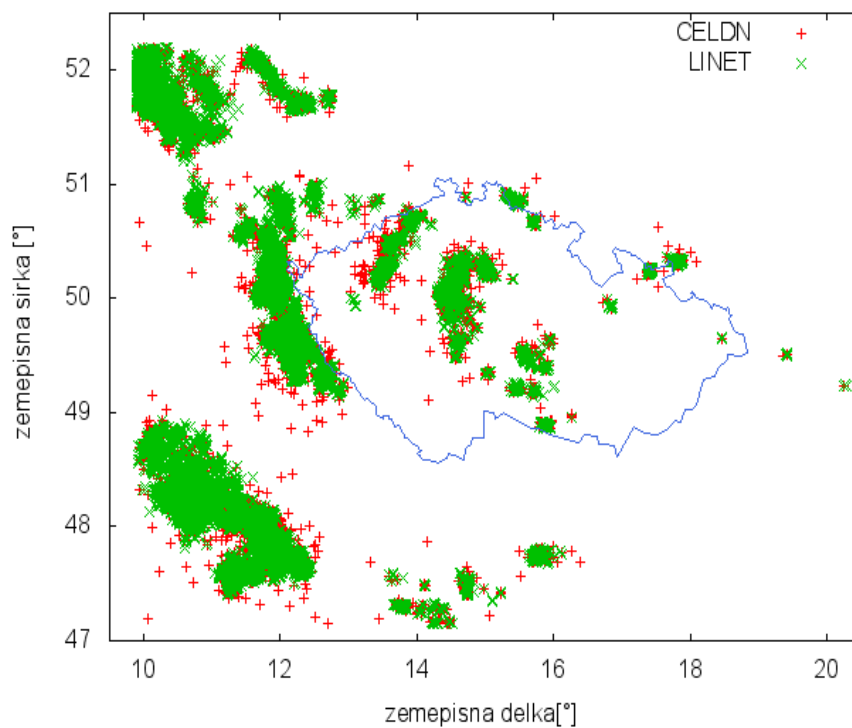
Obrázek 5.22: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 3.7. 2008 v rozmezí 10-11h místního času.



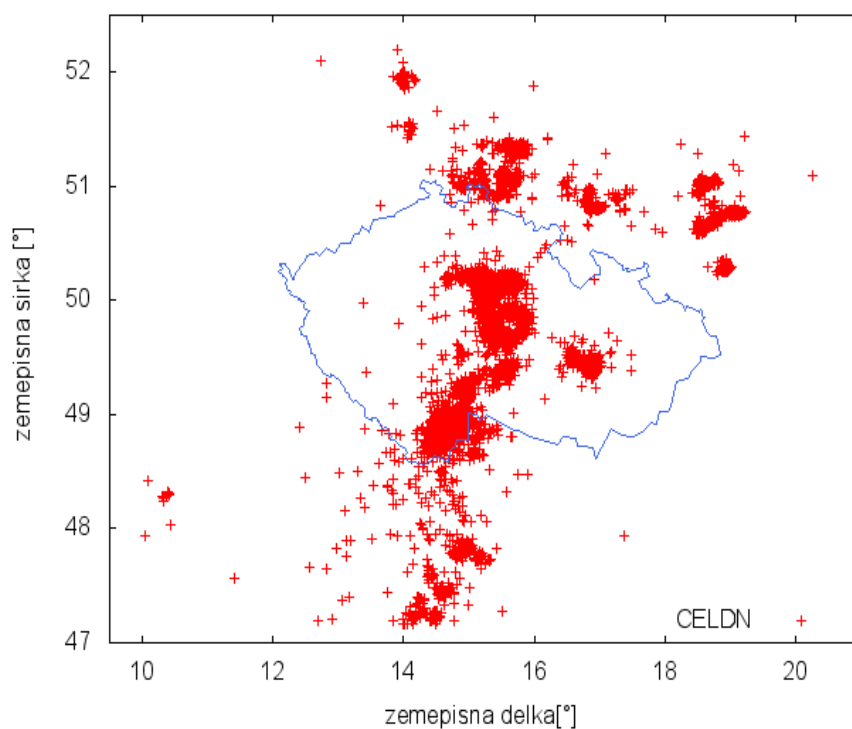
Obrázek 5.23: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 3.7. 2008 v rozmezí 15-16h místního času.



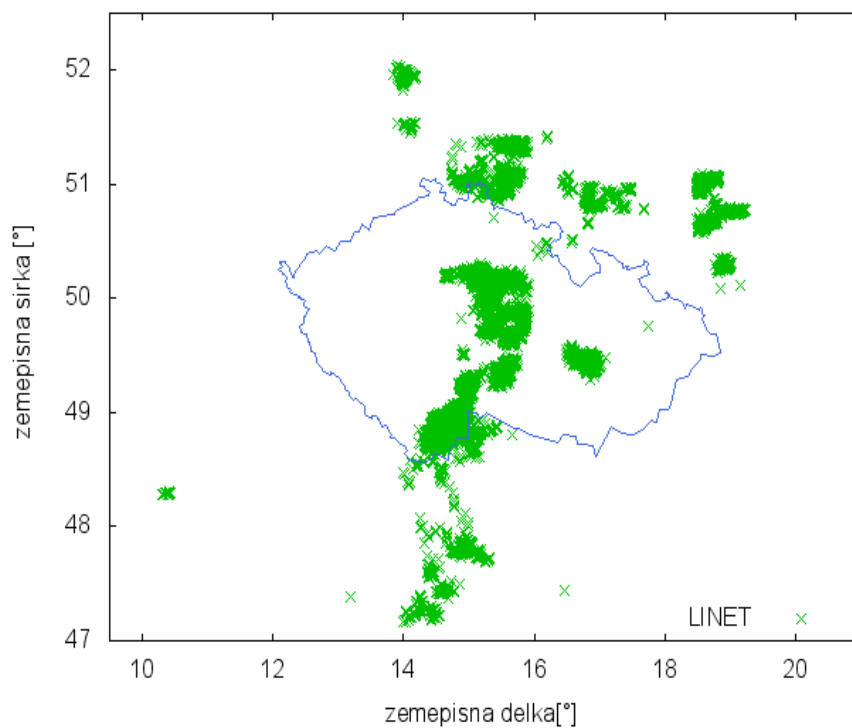
Obrázek 5.24: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 3.7. 2008 v rozmezí 15-16h místního času.



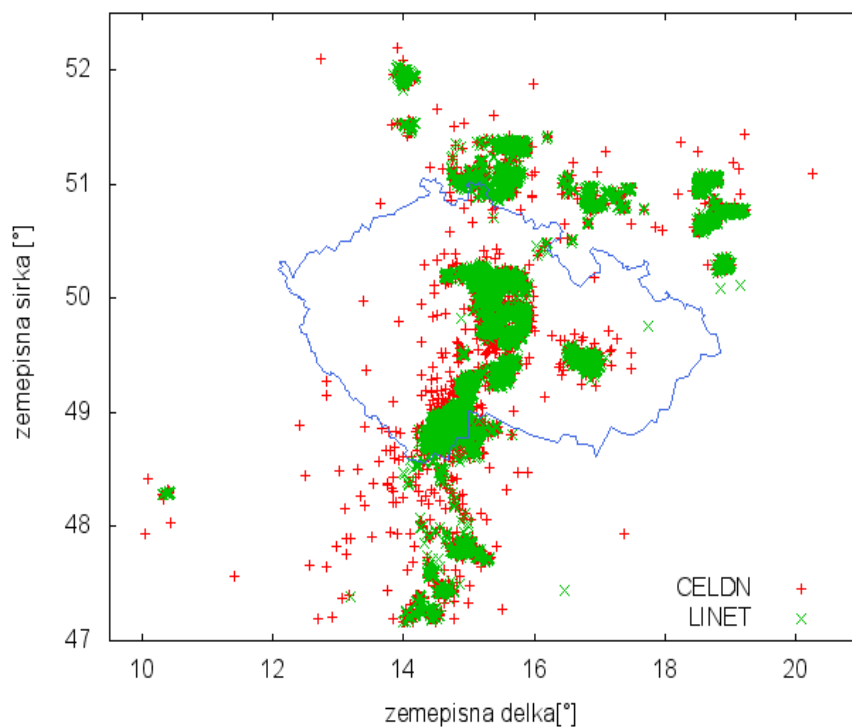
Obrázek 5.25: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 3.7. 2008 v rozmezí 15-16h místního času.



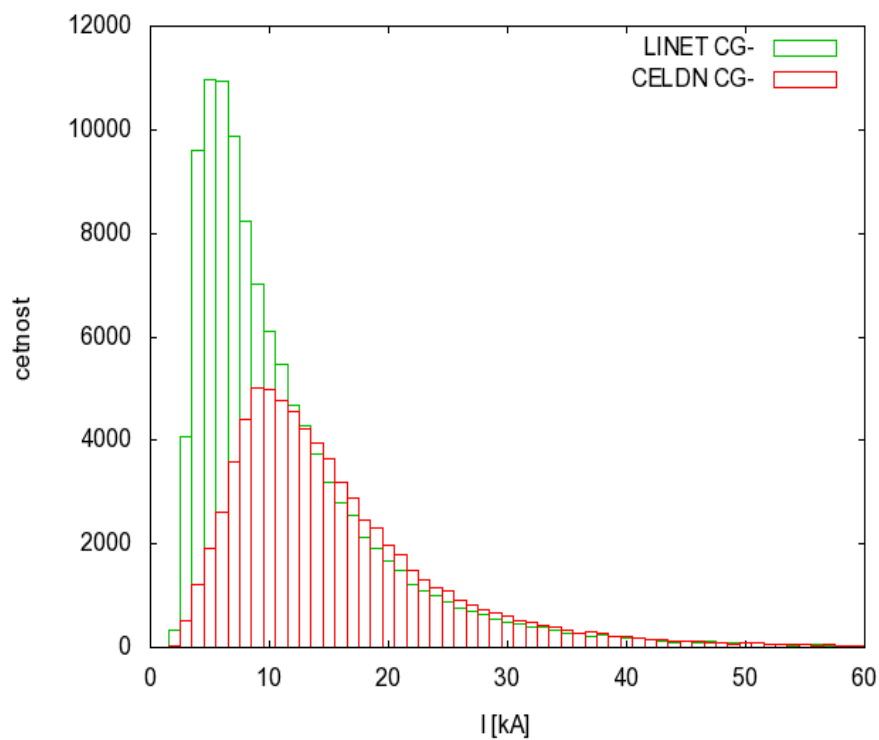
Obrázek 5.26: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 3.7. 2008 v rozmezí 20-21h místního času.



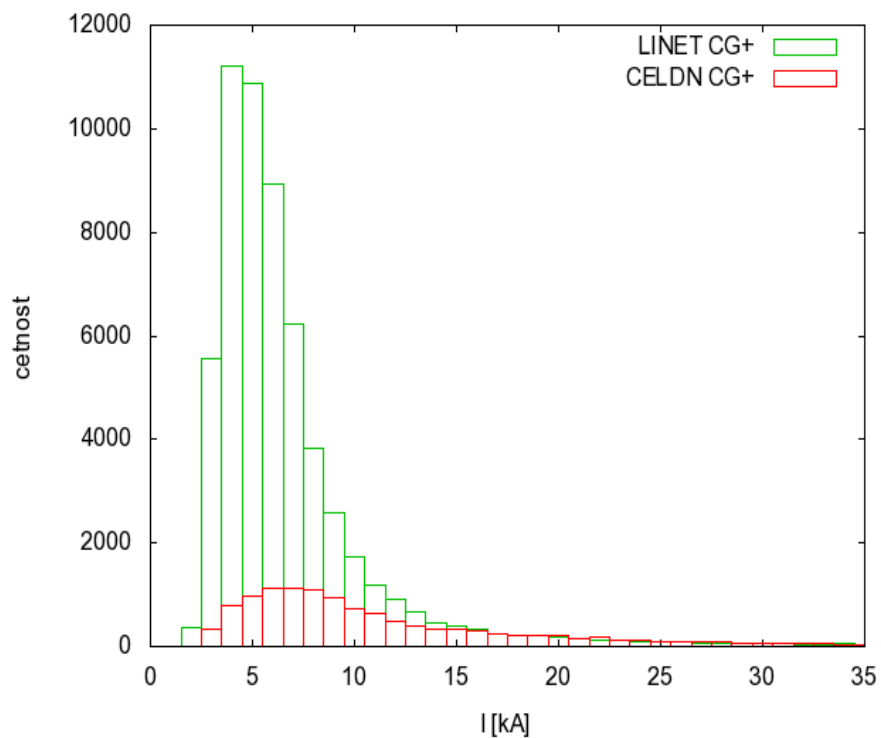
Obrázek 5.27: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 3.7. 2008 v rozmezí 20-21h místního času.



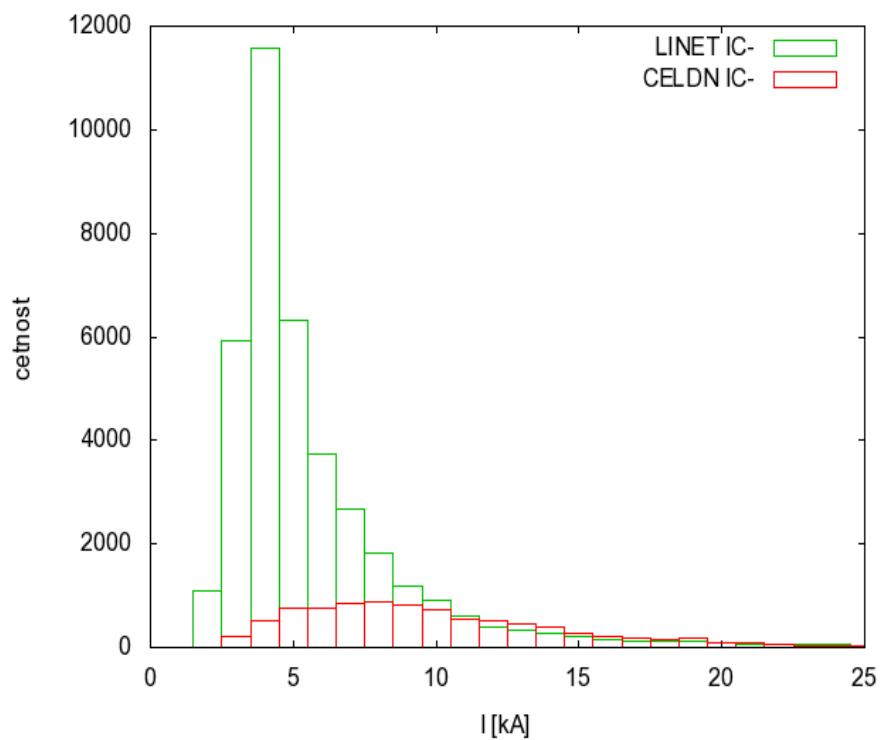
Obrázek 5.28: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 3.7. 2008 v rozmezí 20-21h místního času.



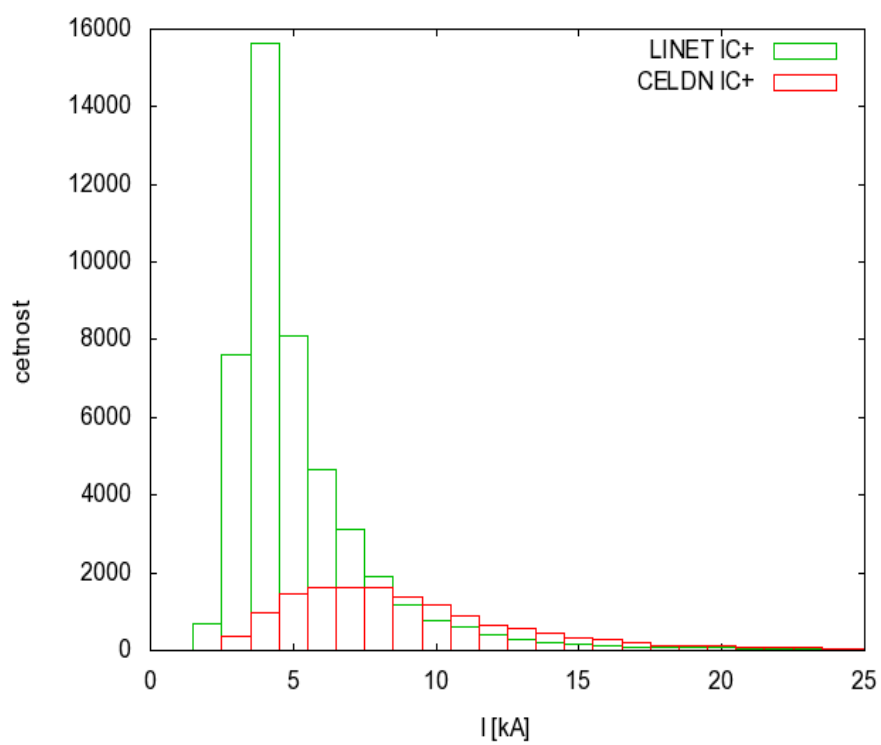
Obrázek 5.29: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG- blesků pro systémy CELDN a LINET 3.7. 2008.



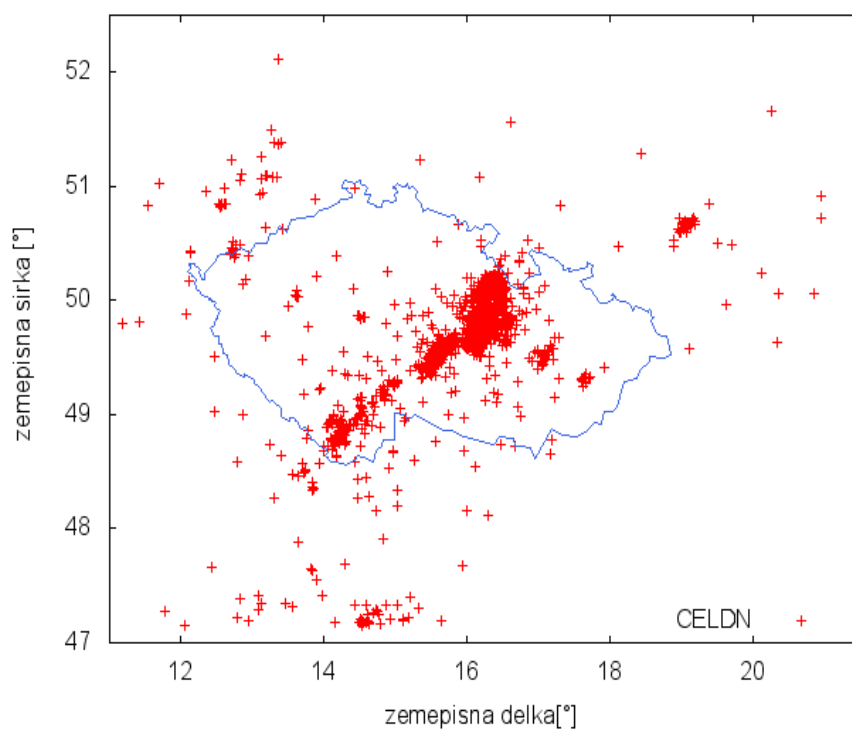
Obrázek 5.30: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG+ blesků pro systémy CELDN a LINET 3.7. 2008.



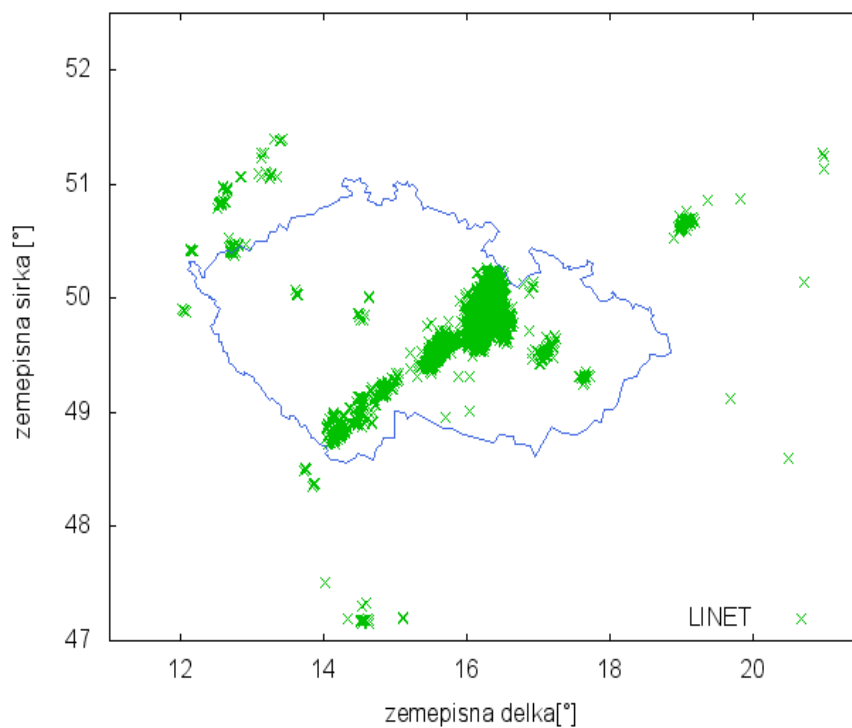
Obrázek 5.31: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC- blesků pro systémy CELDN a LINET 3.7. 2008.



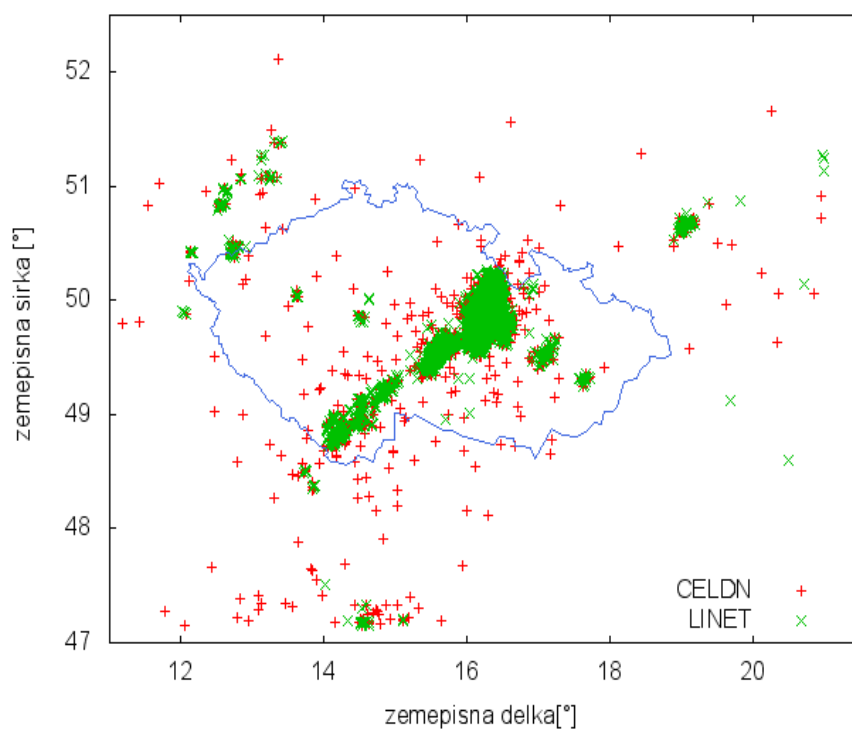
Obrázek 5.32: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC+ blesků pro systémy CELDN a LINET 3.7. 2008.



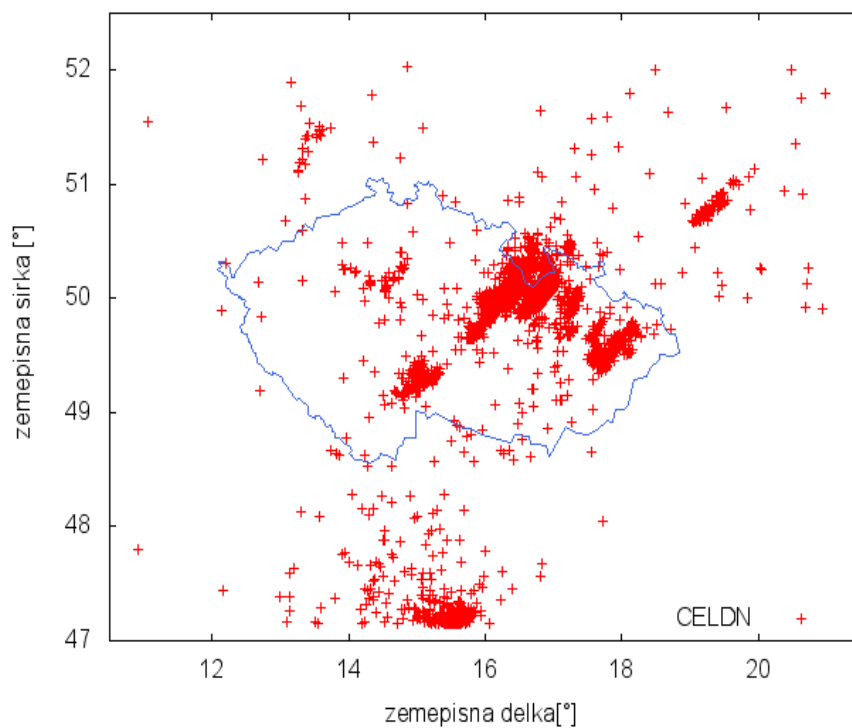
Obrázek 5.33: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 15.8. 2008 v rozmezí 1-2h místního času.



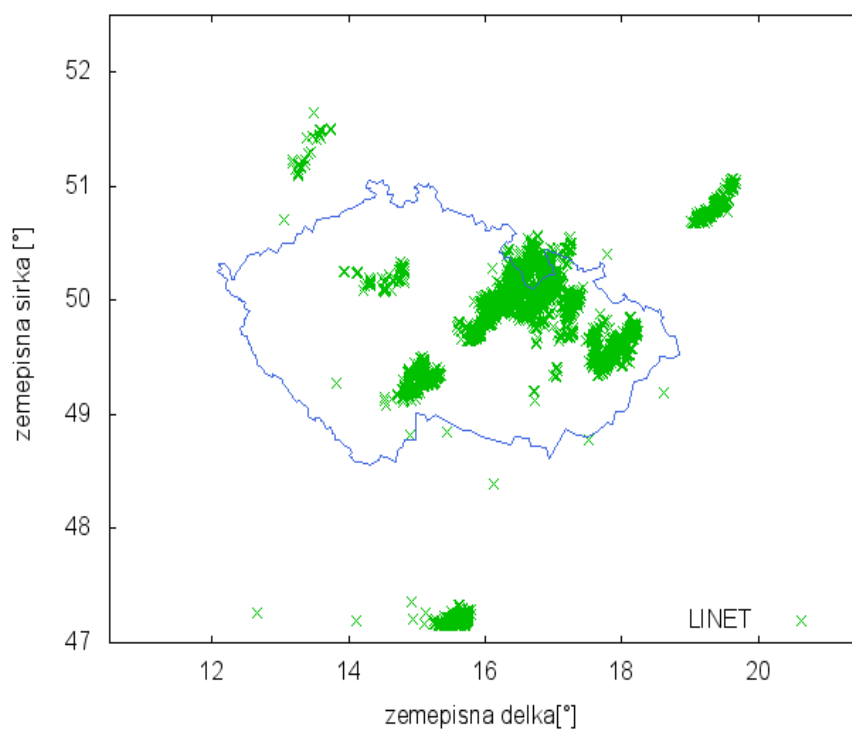
Obrázek 5.34: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 15.8. 2008 v rozmezí 1-2h místního času.



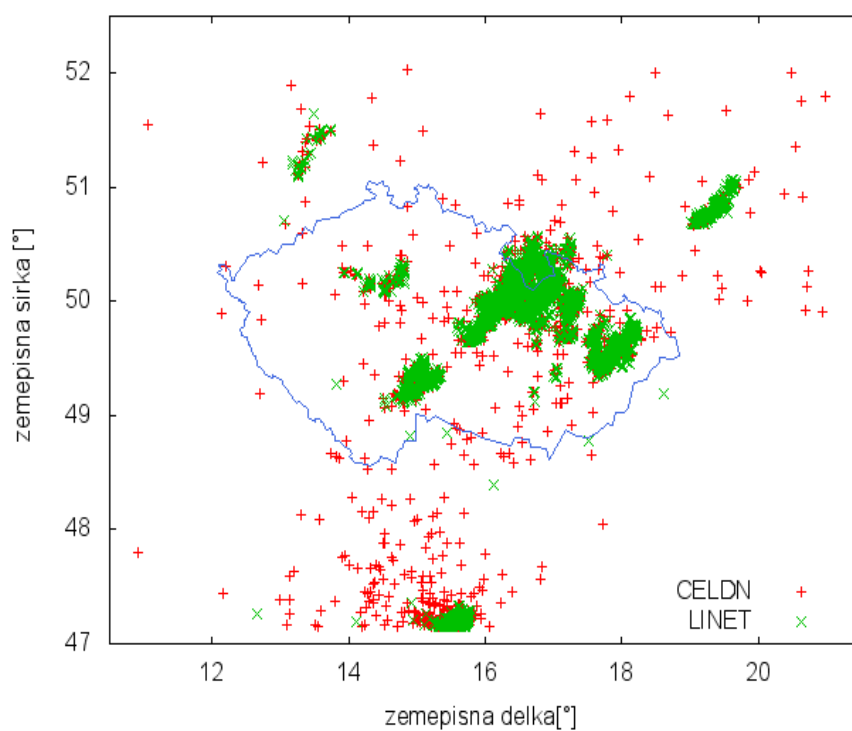
Obrázek 5.35: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 15.8. 2008 v rozmezí 1-2h místního času.



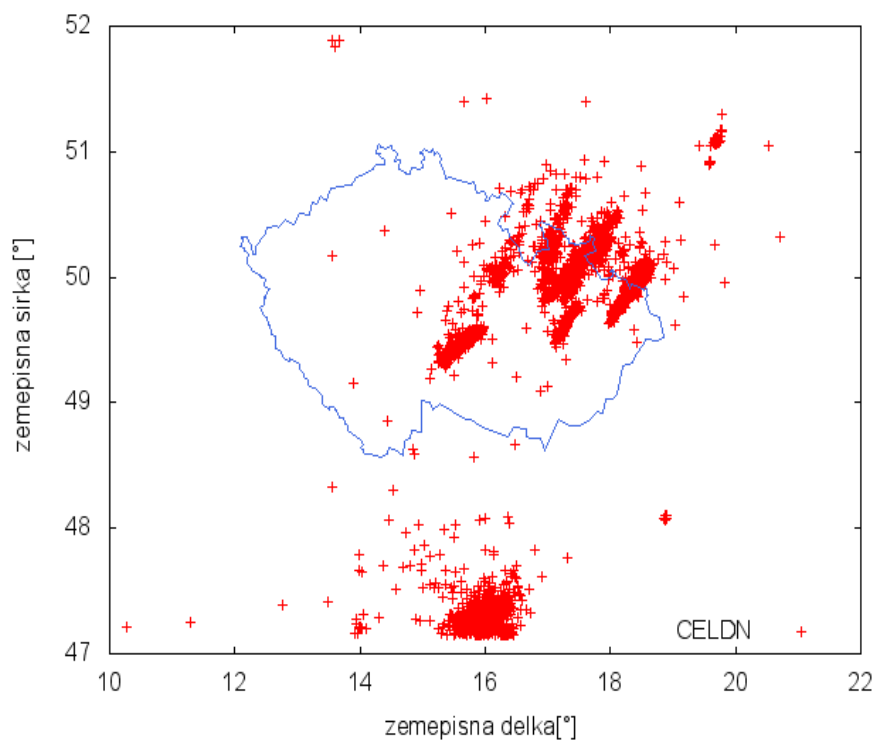
Obrázek 5.36: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 15.8. 2008 v rozmezí 2-3h místního času.



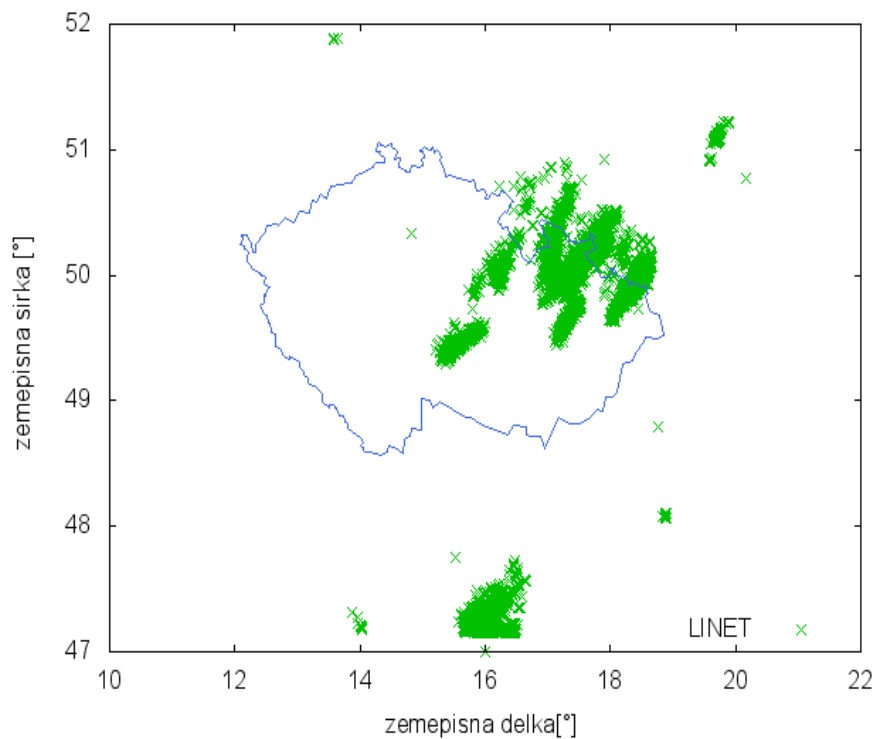
Obrázek 5.37: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 15.8. 2008 v rozmezí 2-3h místního času.



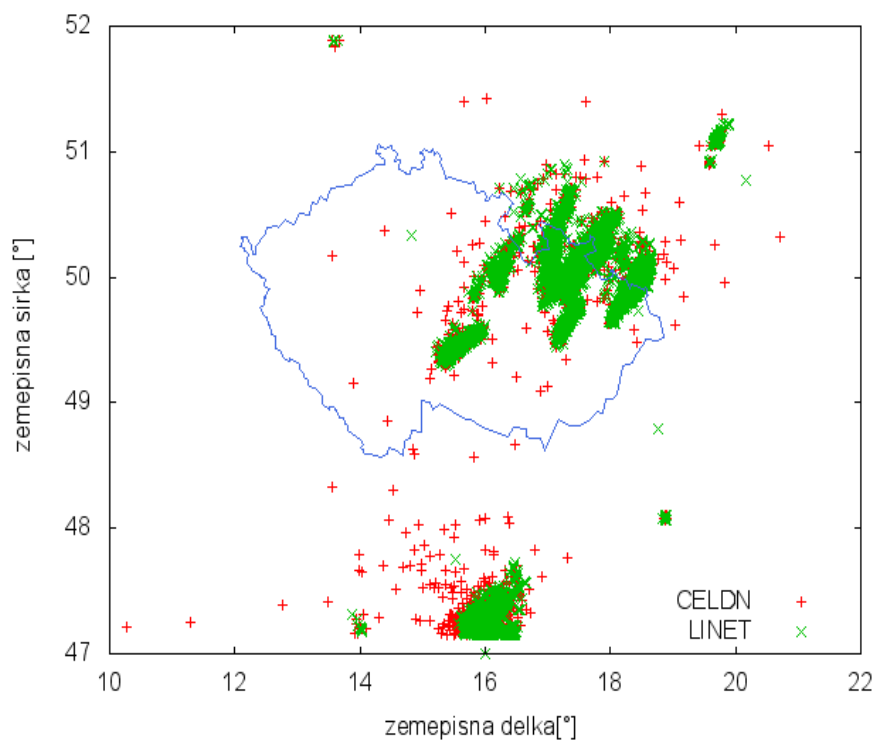
Obrázek 5.38: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 15.8. 2008 v rozmezí 2-3h místního času.



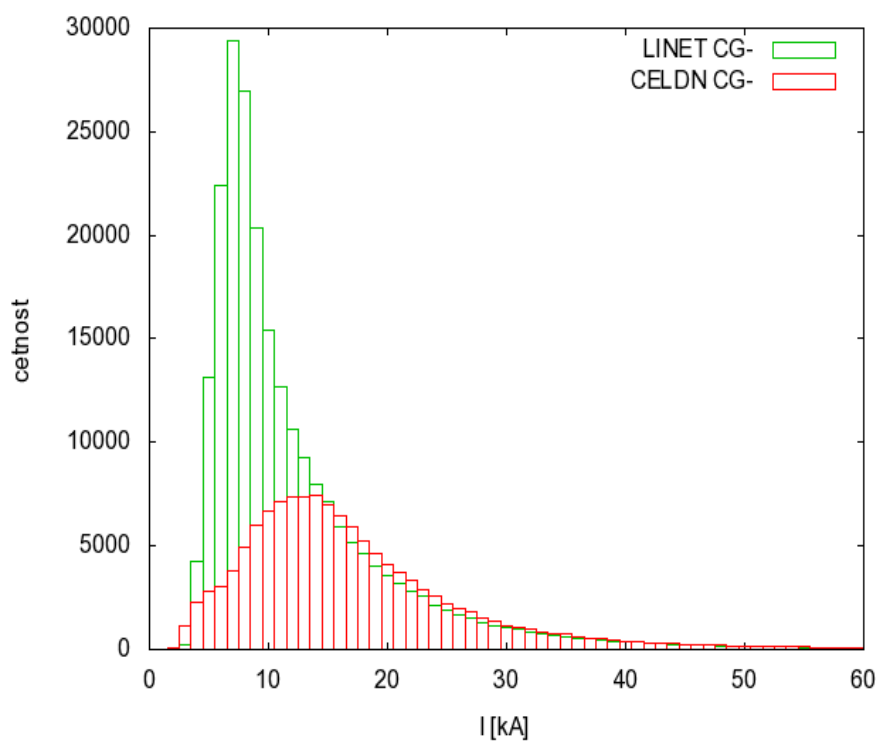
Obrázek 5.39: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 15.8. 2008 v rozmezí 3-4h místního času.



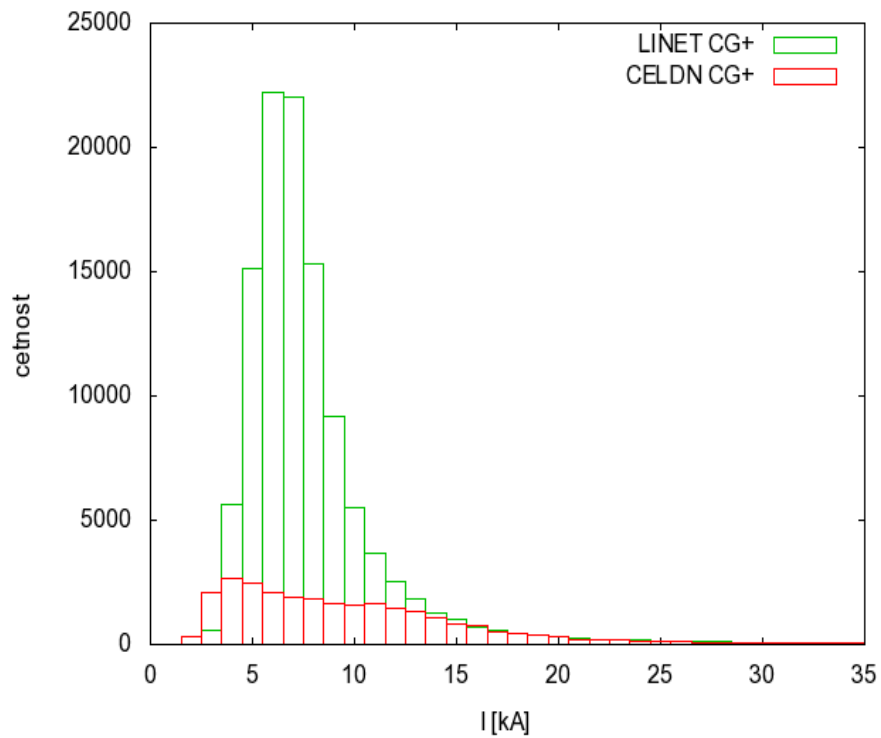
Obrázek 5.40: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 15.8. 2008 v rozmezí 3-4h místního času.



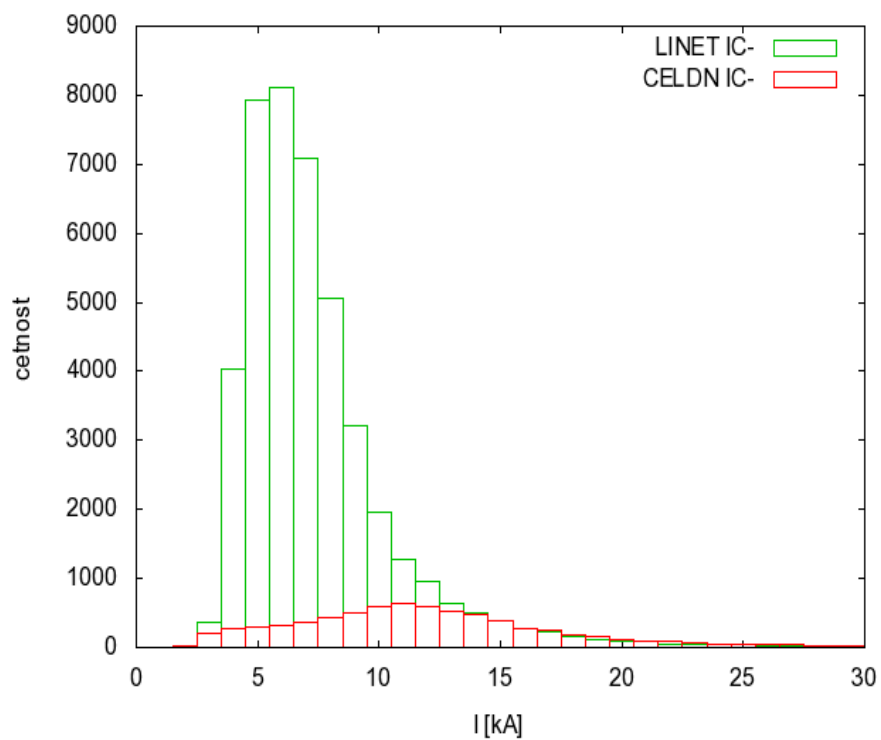
Obrázek 5.41: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 15.8. 2008 v rozmezí 3-4h místního času.



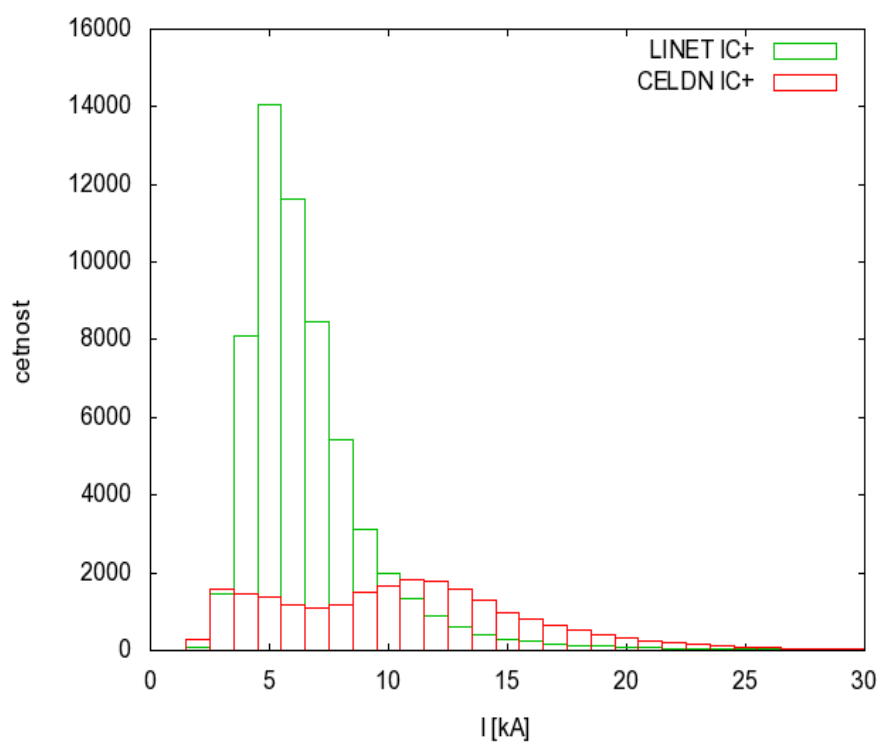
Obrázek 5.42: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG- blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2008.



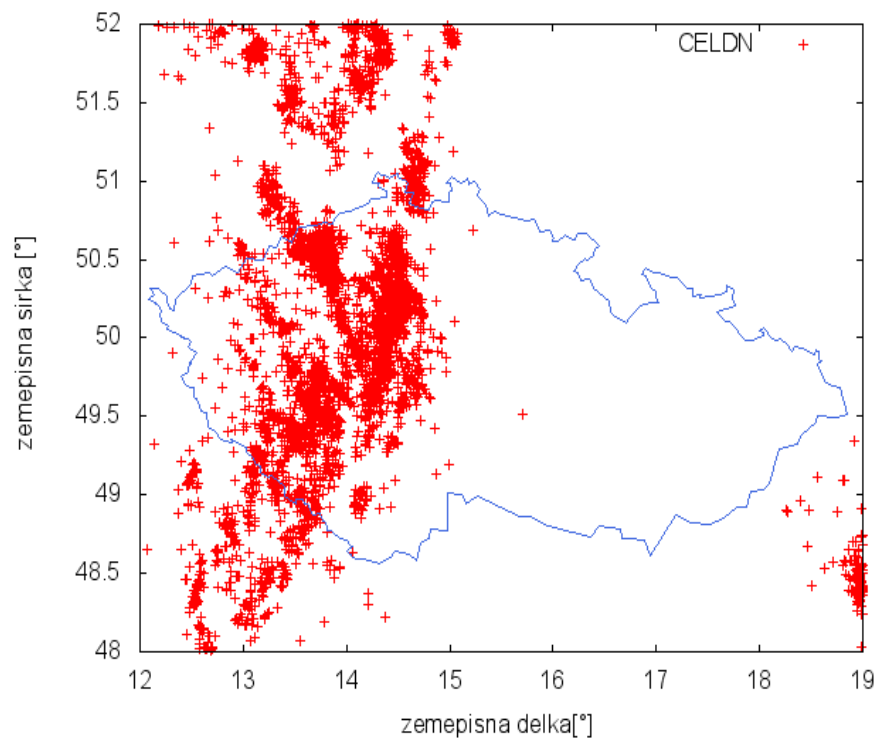
Obrázek 5.43: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG+ blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2008.



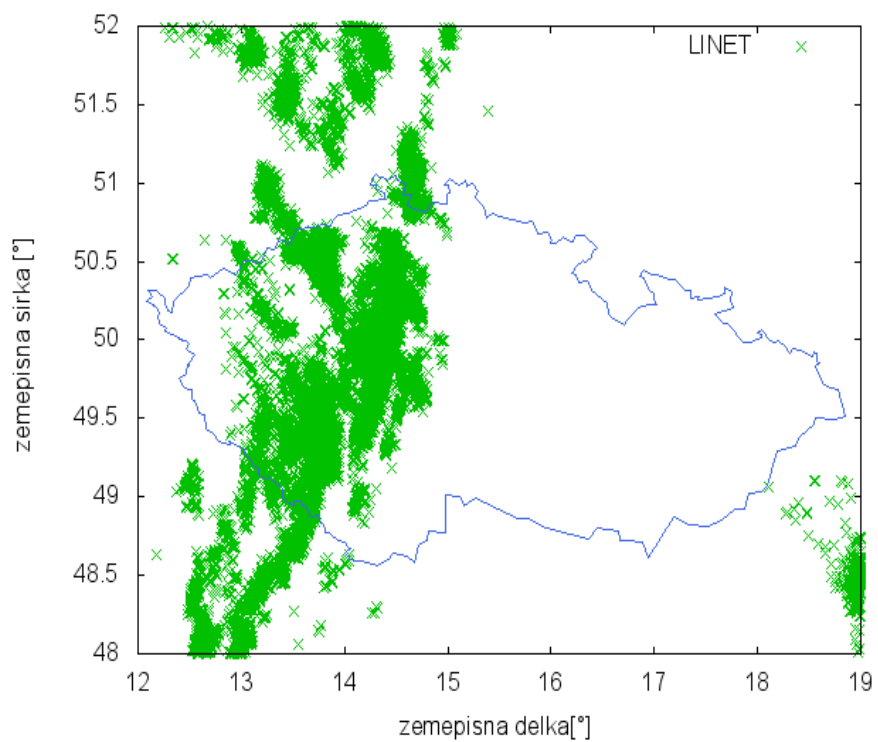
Obrázek 5.44: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC- blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2008.



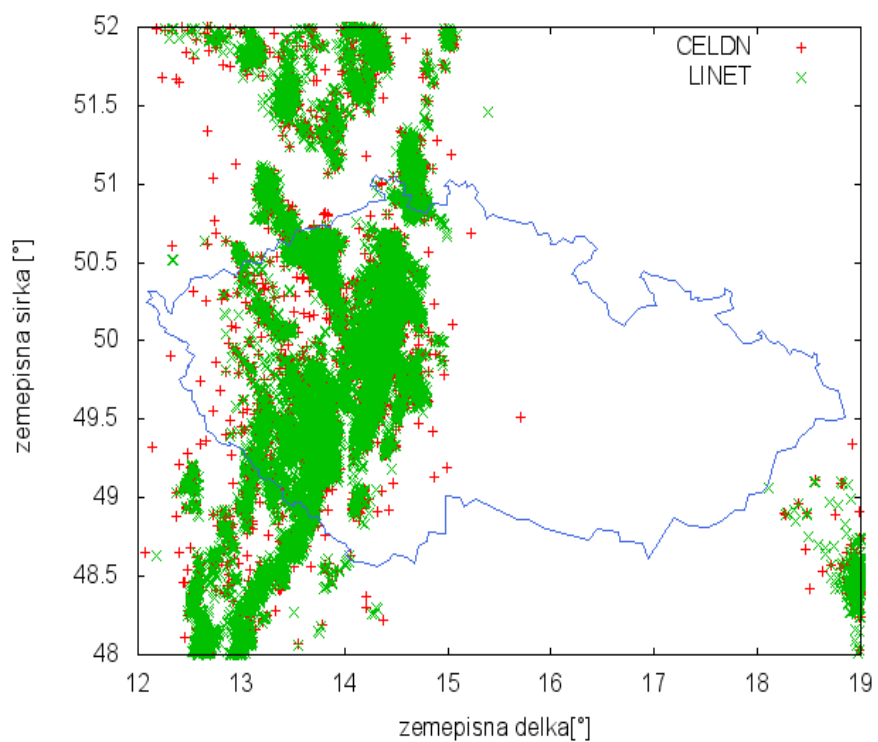
Obrázek 5.45: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC+ blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2008.



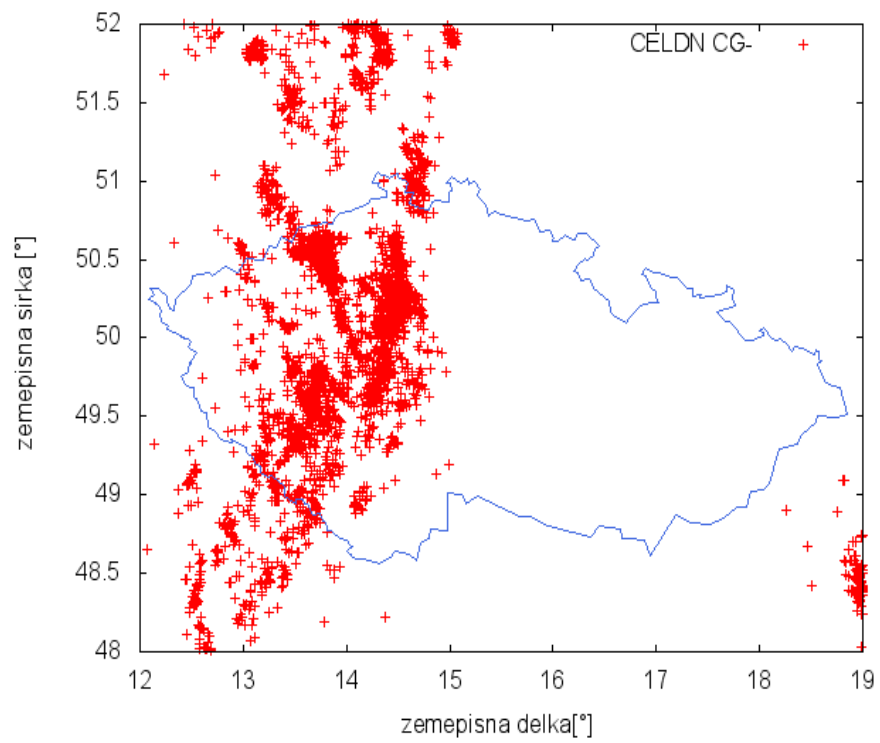
Obrázek 5.46: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem CELDN 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



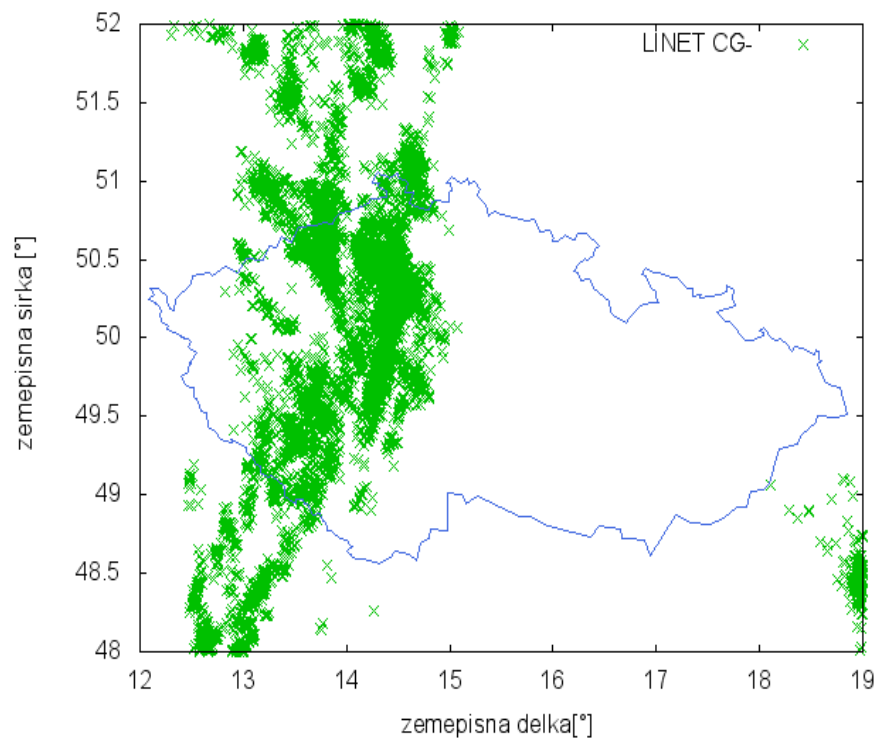
Obrázek 5.47: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



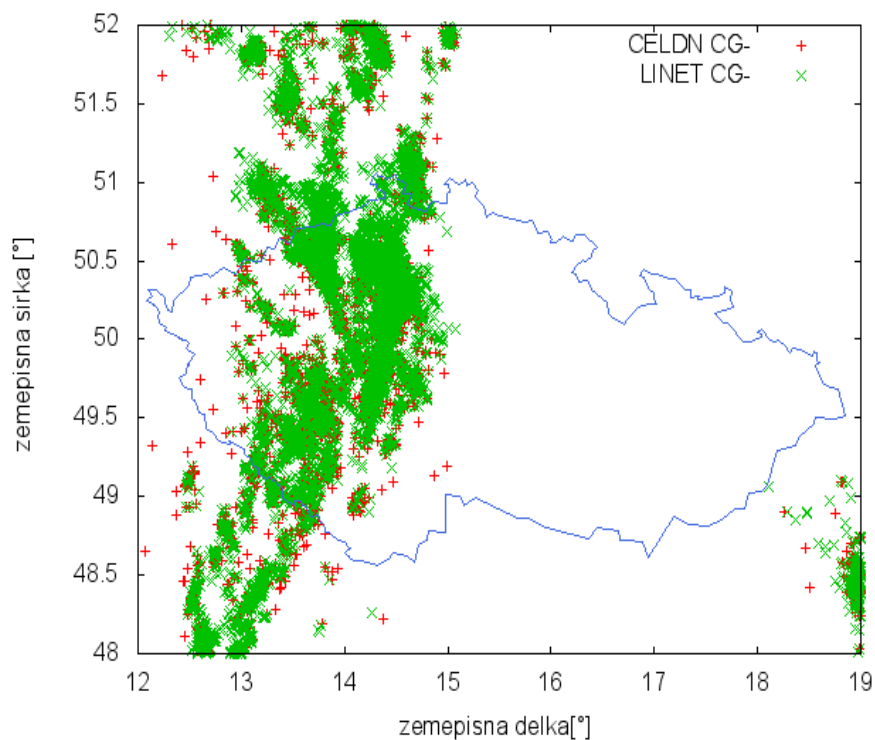
Obrázek 5.48: Pozice detekovaných bleskových výbojů systémy CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



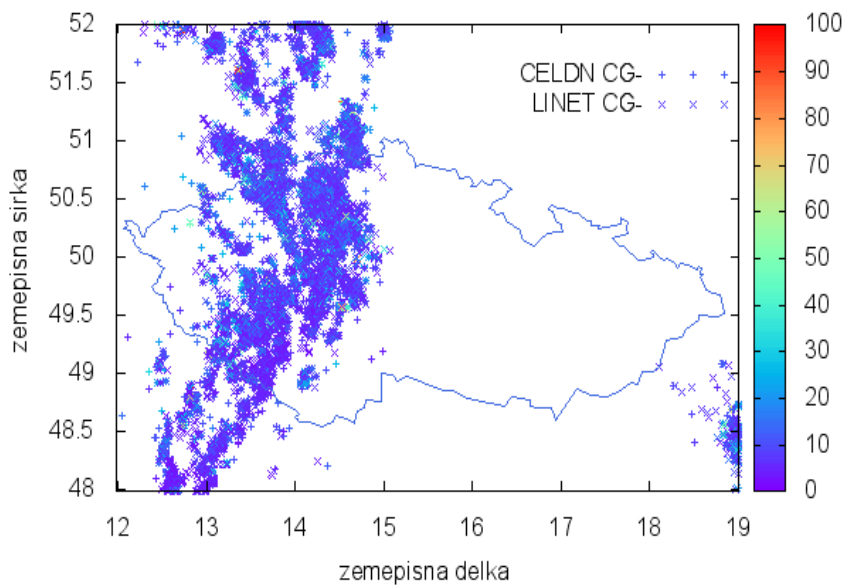
Obrázek 5.49: Pozice detekovaných CG- blesků systémem CELDN 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



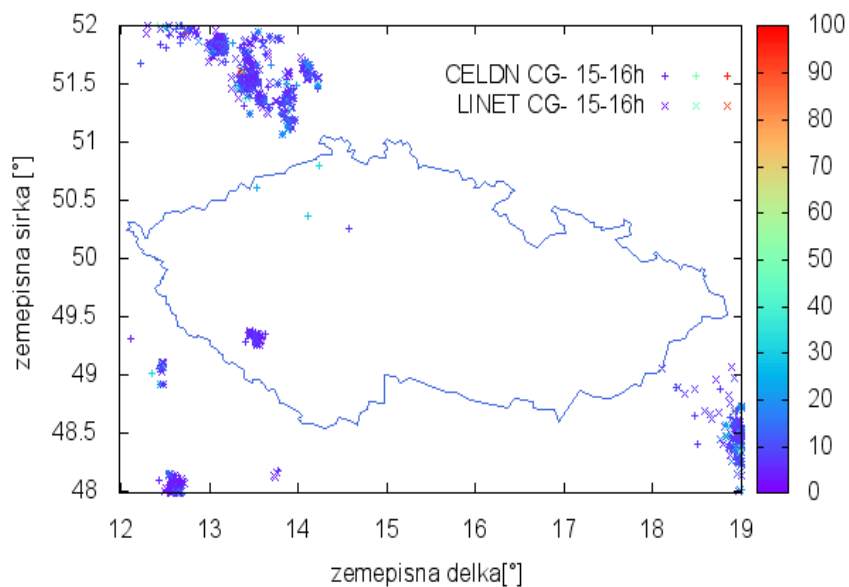
Obrázek 5.50: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



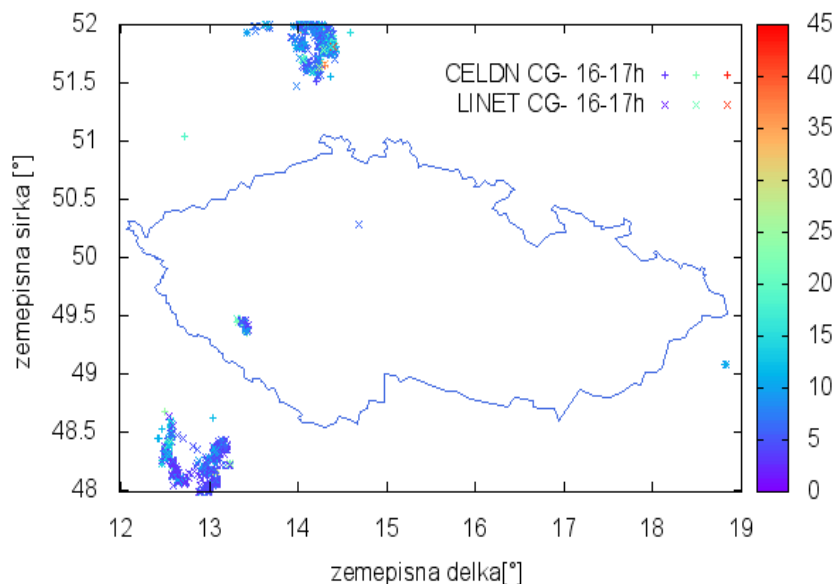
Obrázek 5.51: Pozice detekovaných CG- blesků systému CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



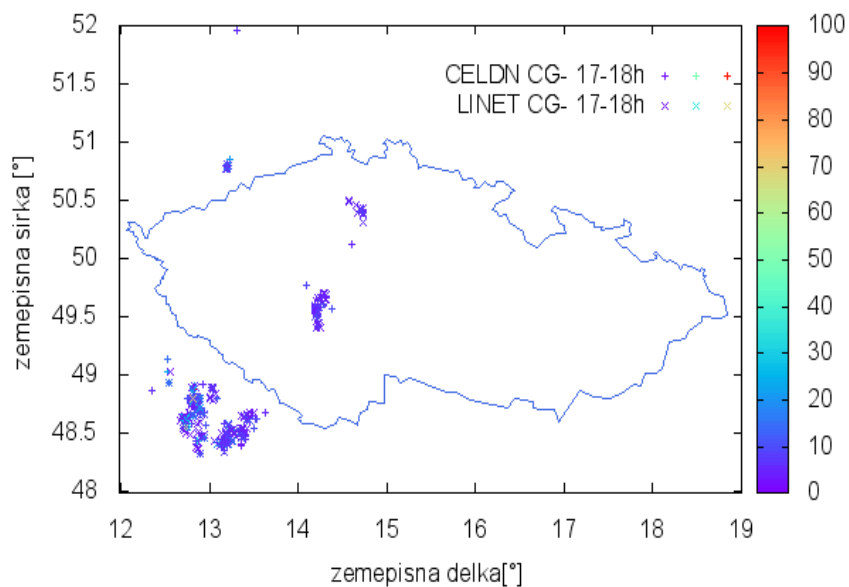
Obrázek 5.52: Pozice detekovaných bleskových výbojů CG- systému CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



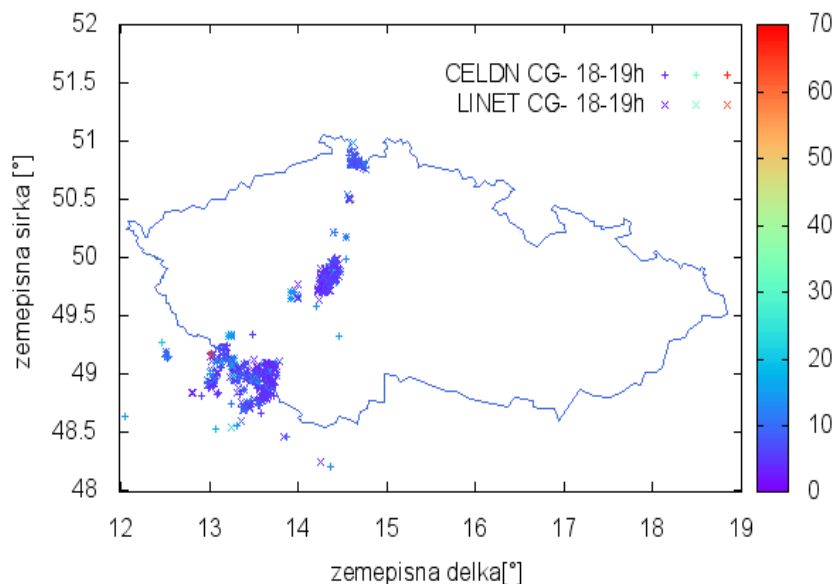
Obrázek 5.53: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 15-16h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



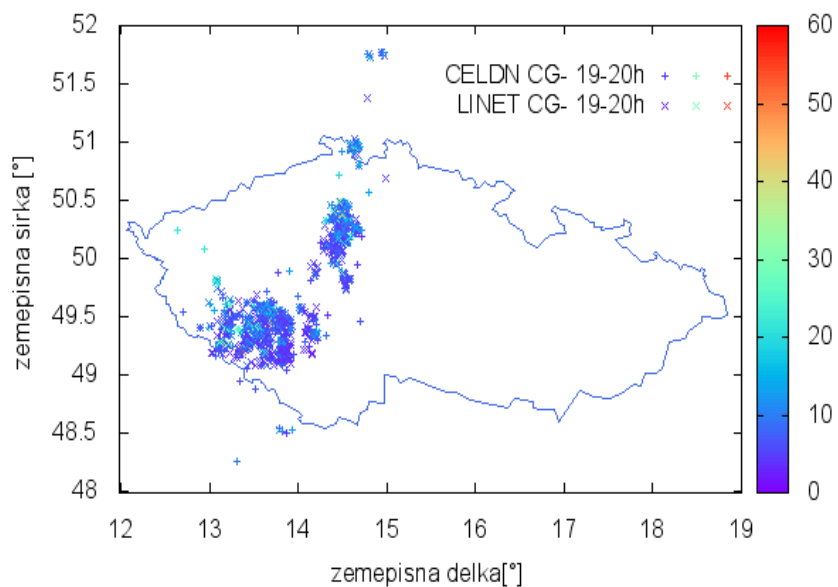
Obrázek 5.54: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 16-17h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



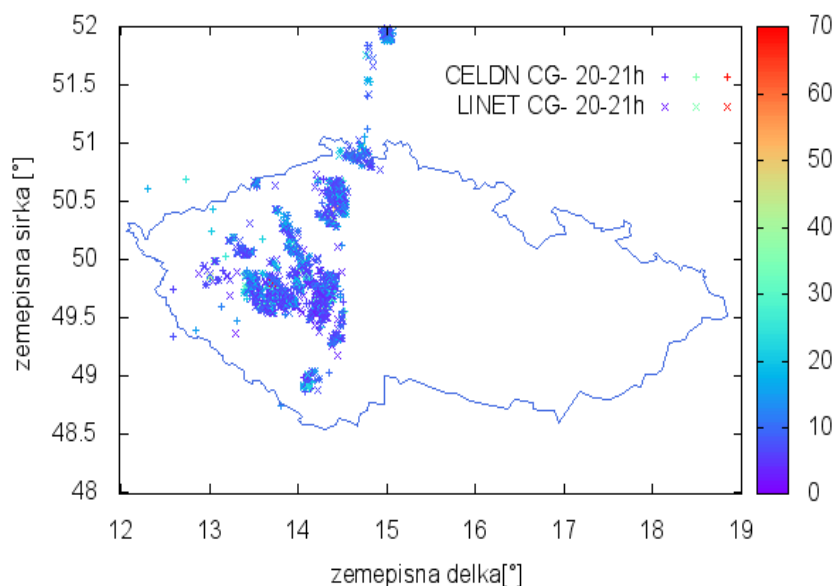
Obrázek 5.55: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 17-18h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



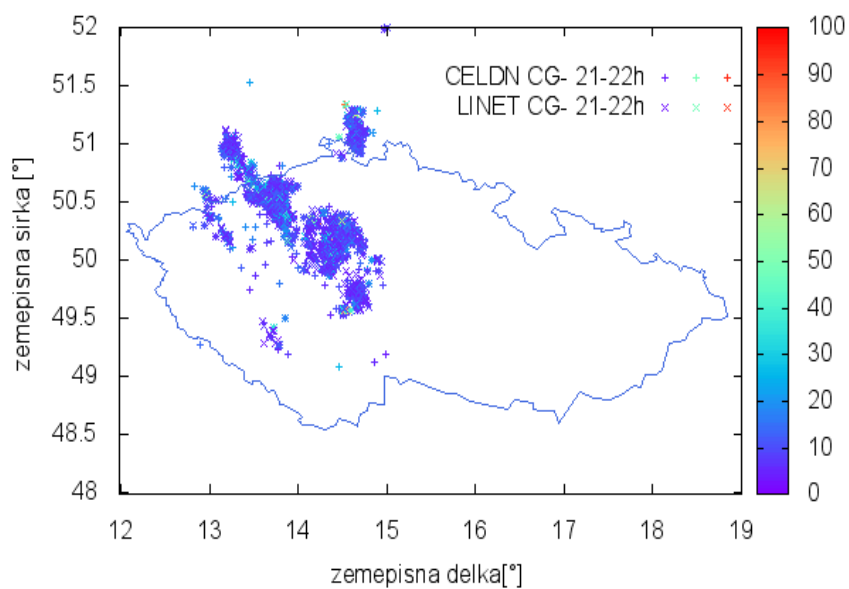
Obrázek 5.56: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 18-19h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



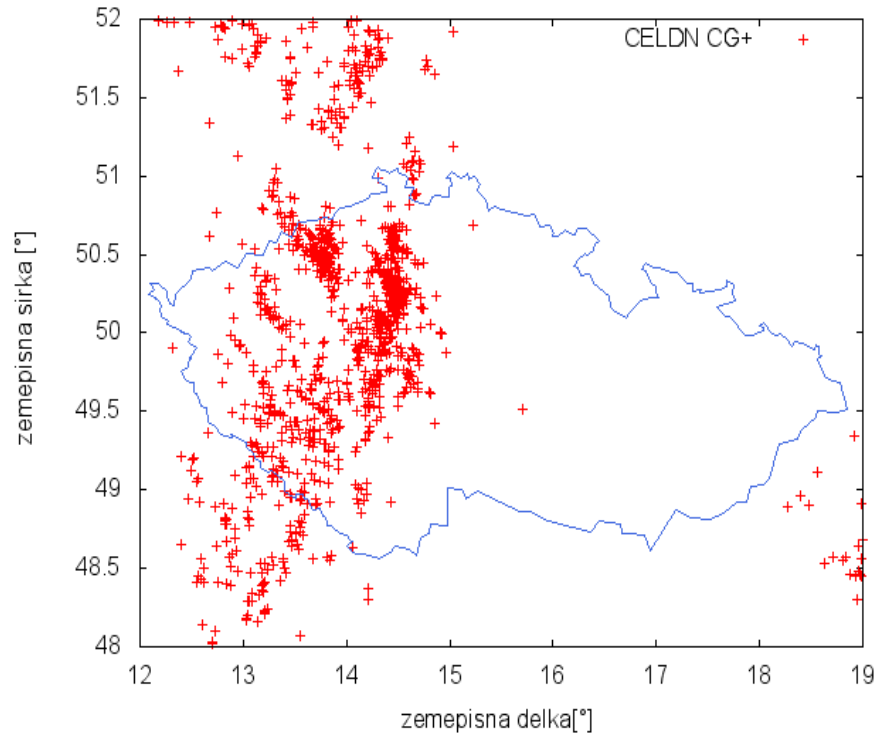
Obrázek 5.57: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 19-20h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



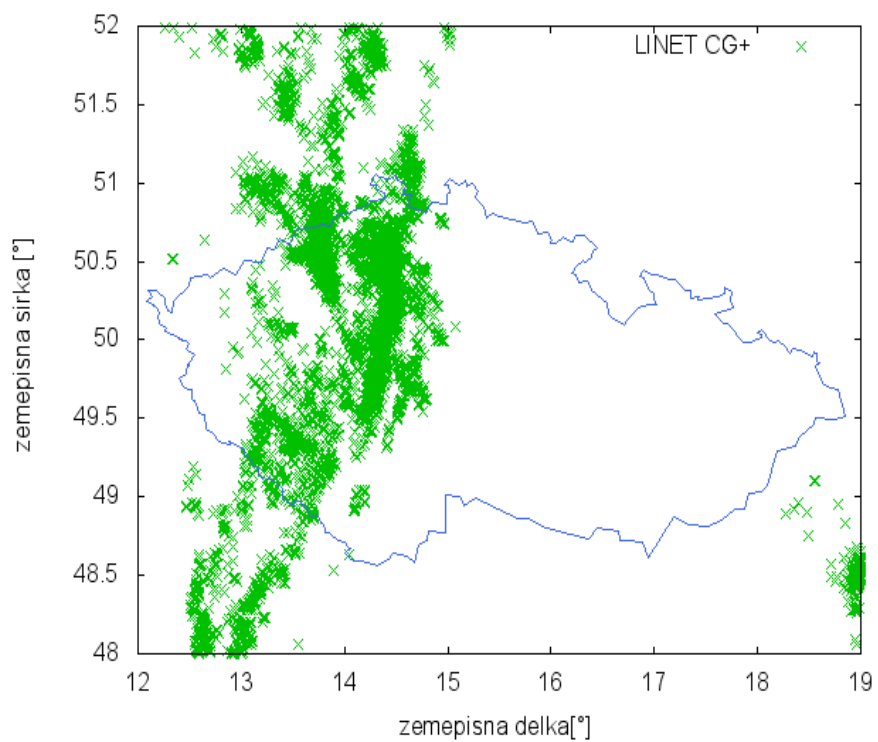
Obrázek 5.58: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 20-21h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



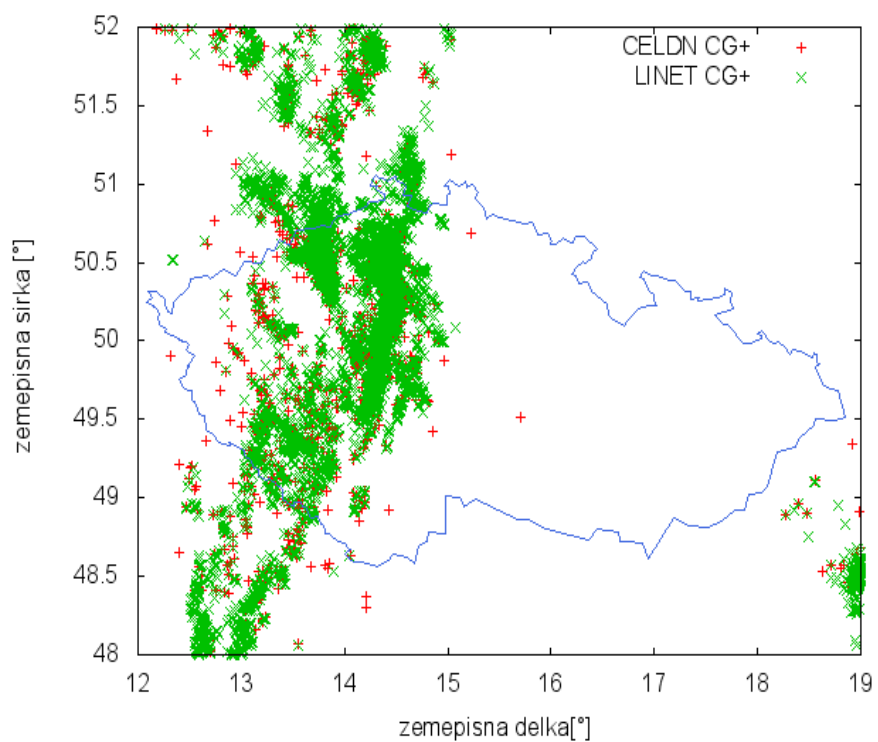
Obrázek 5.59: Pozice detekovaných CG- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 21-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



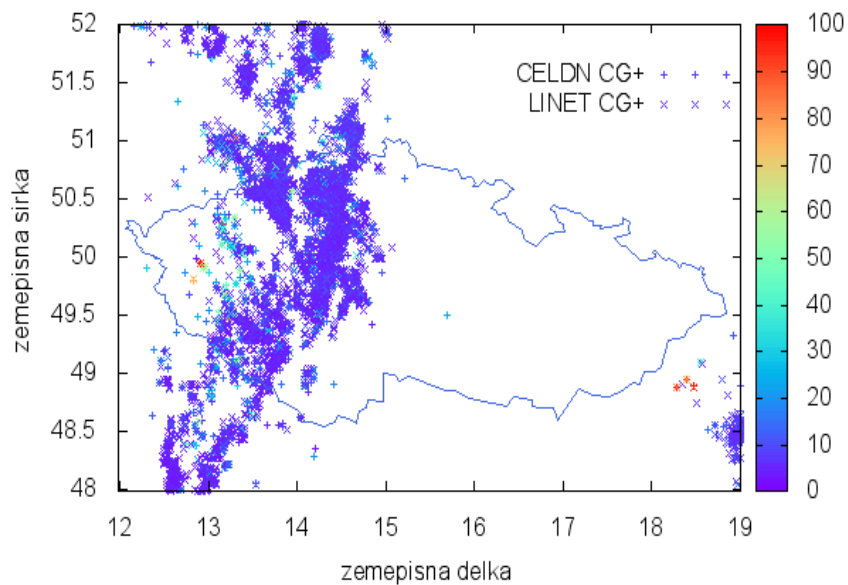
Obrázek 5.60: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem CELDN 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



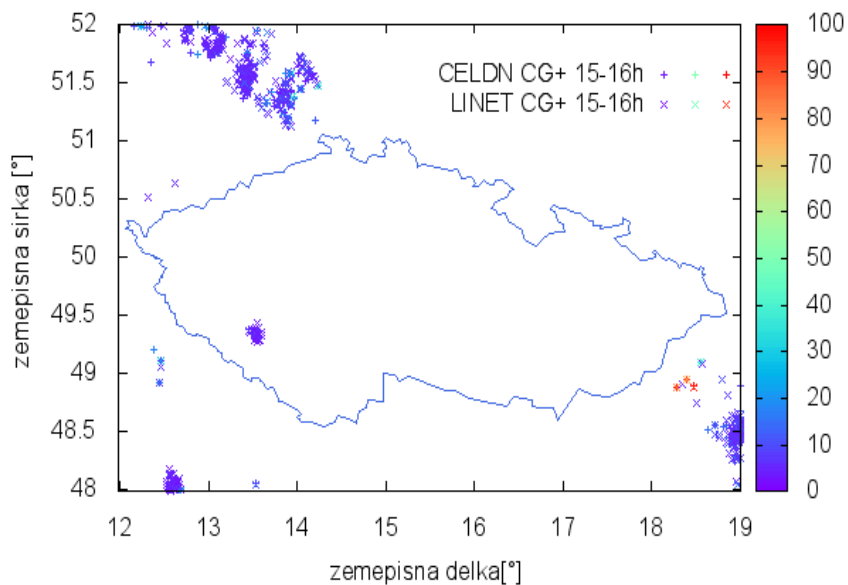
Obrázek 5.61: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



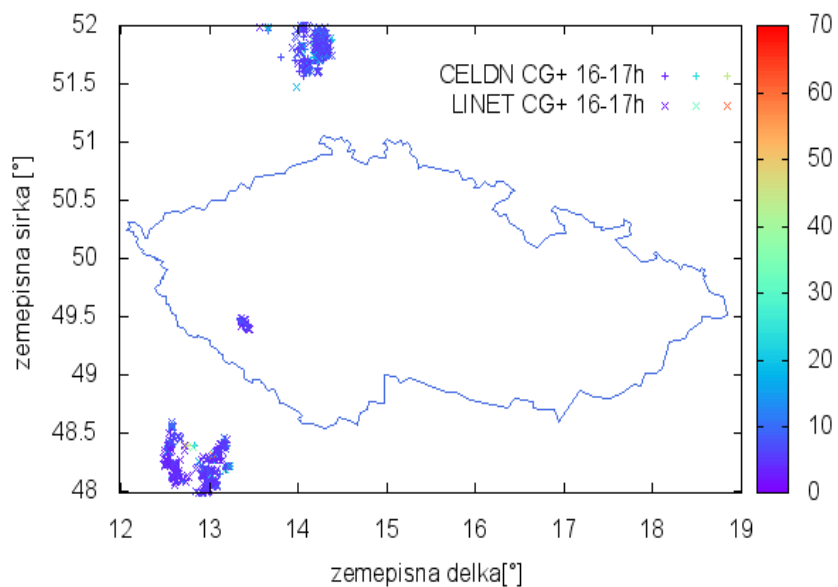
Obrázek 5.62: Pozice detekovaných CG+ blesků systémy CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



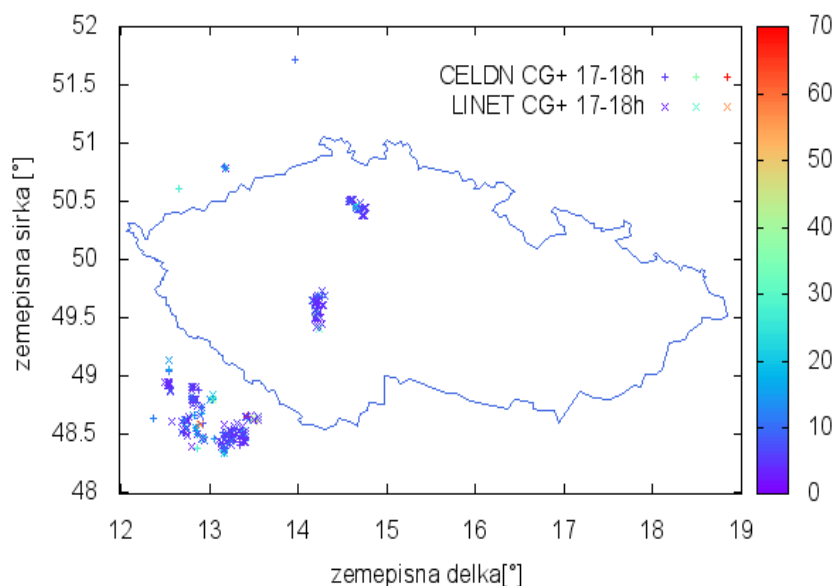
Obrázek 5.63: Pozice detekovaných bleskových výbojů CG+ systému CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



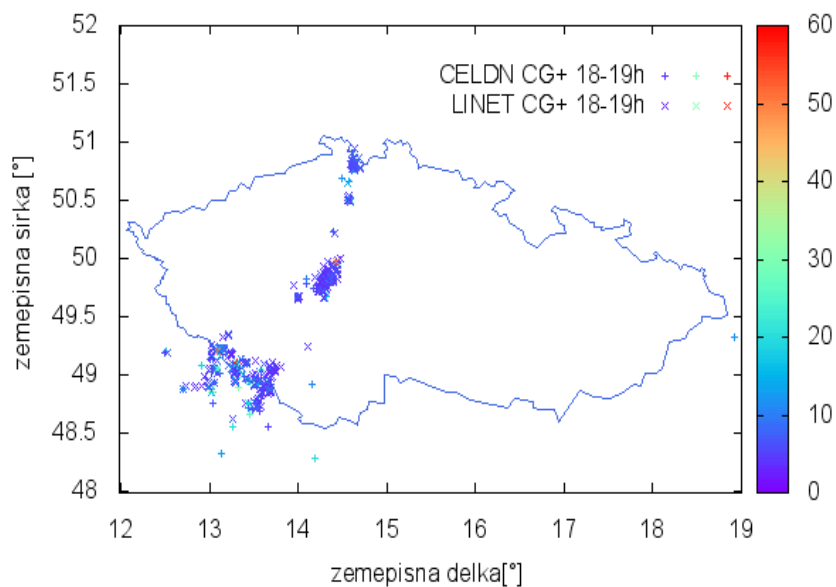
Obrázek 5.64: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 15-16h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



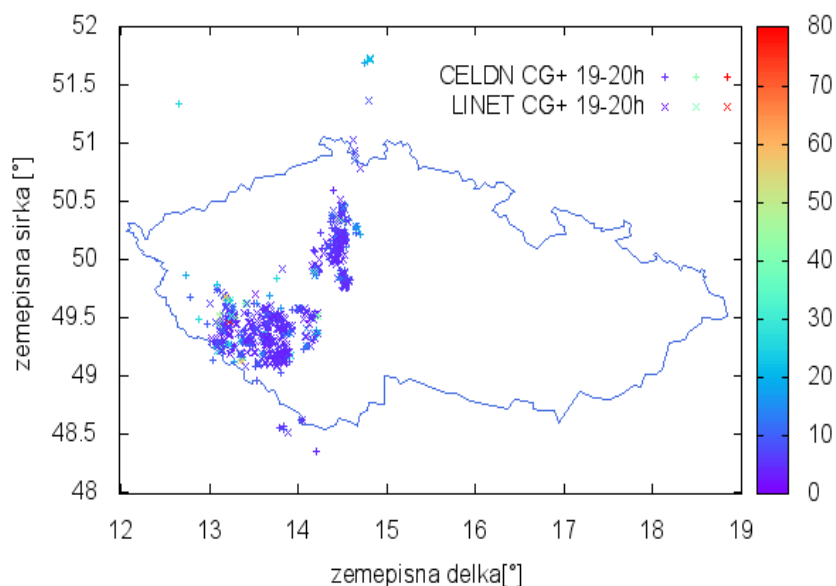
Obrázek 5.65: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 16-17h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



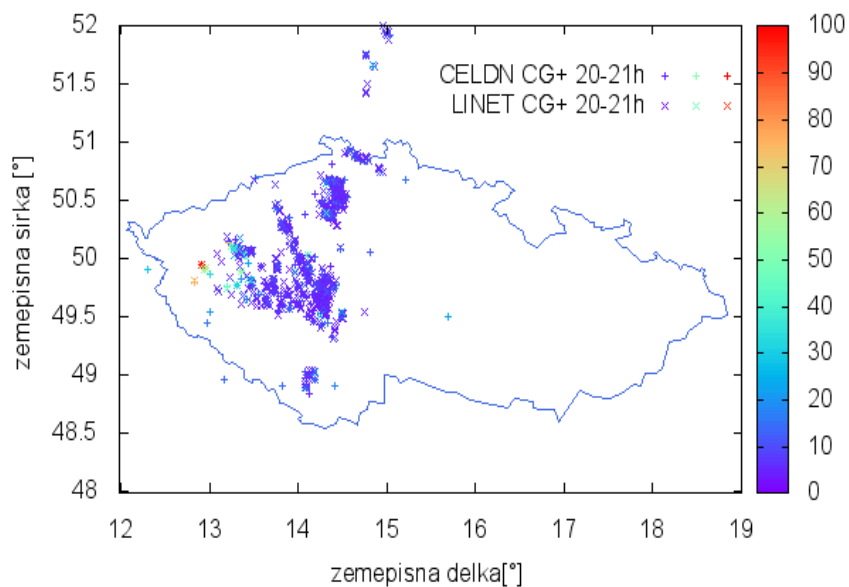
Obrázek 5.66: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 17-18h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



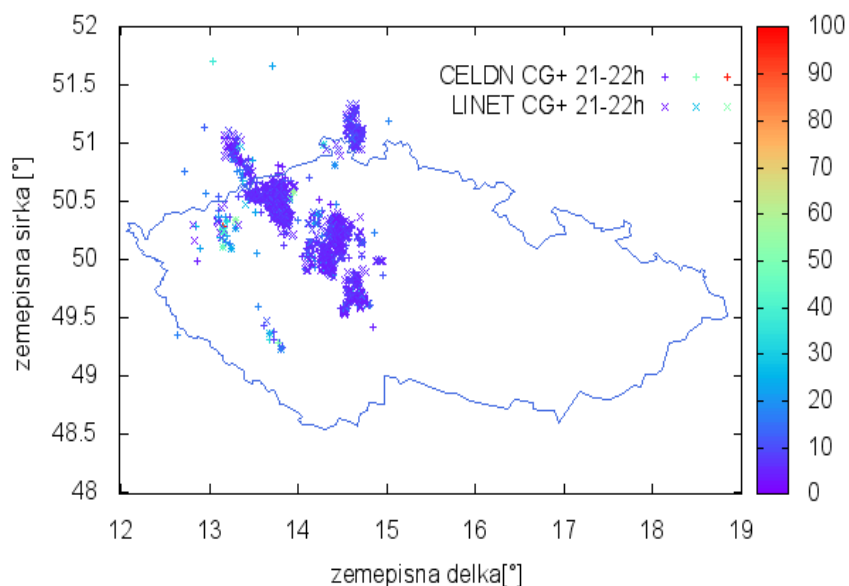
Obrázek 5.67: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 18-19h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



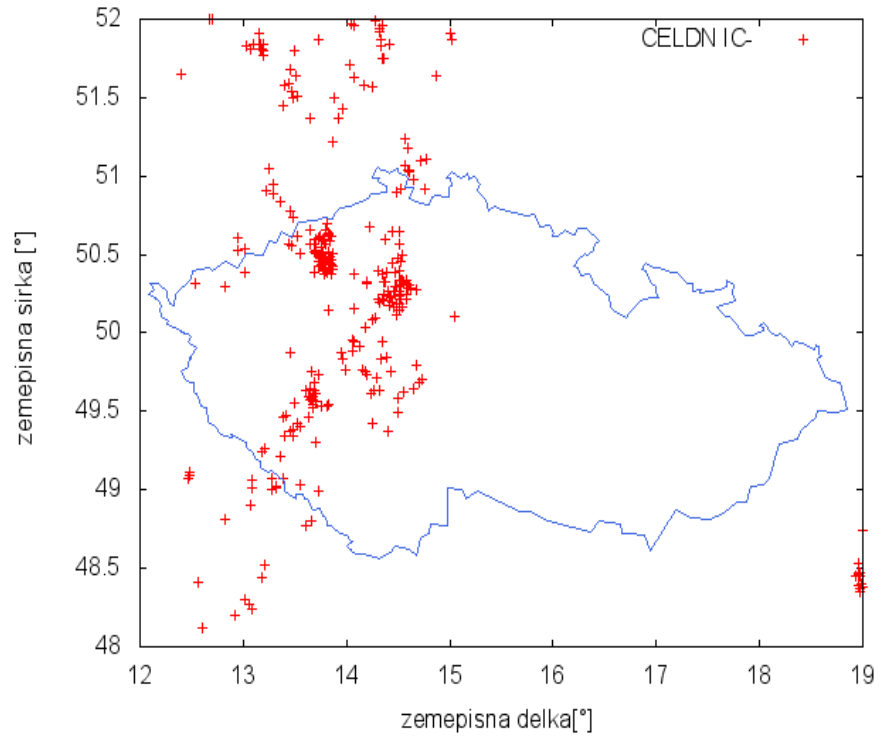
Obrázek 5.68: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 19-20h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



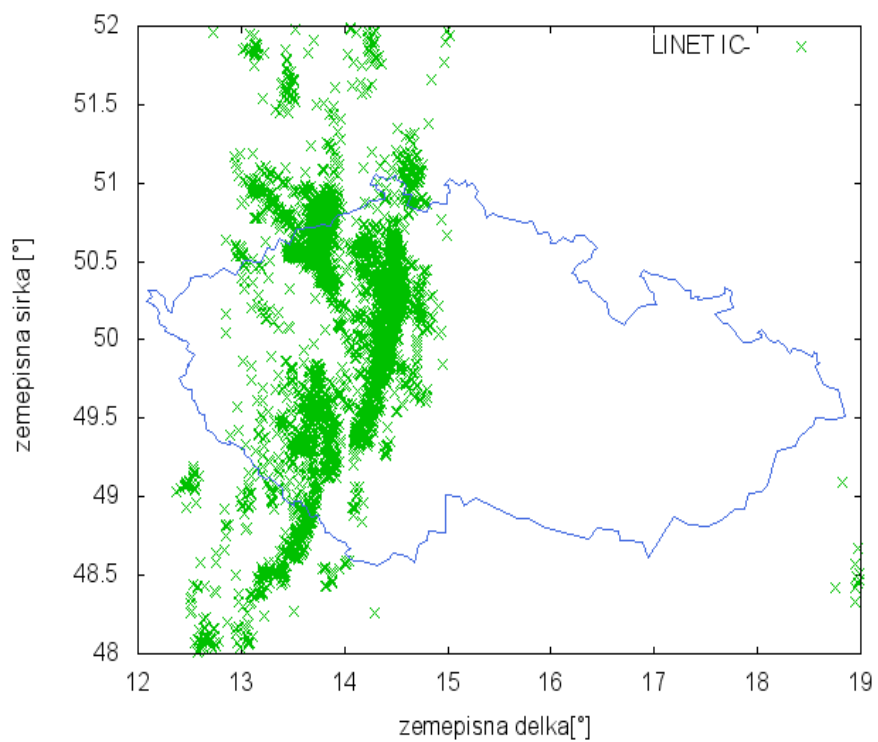
Obrázek 5.69: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 20-21h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



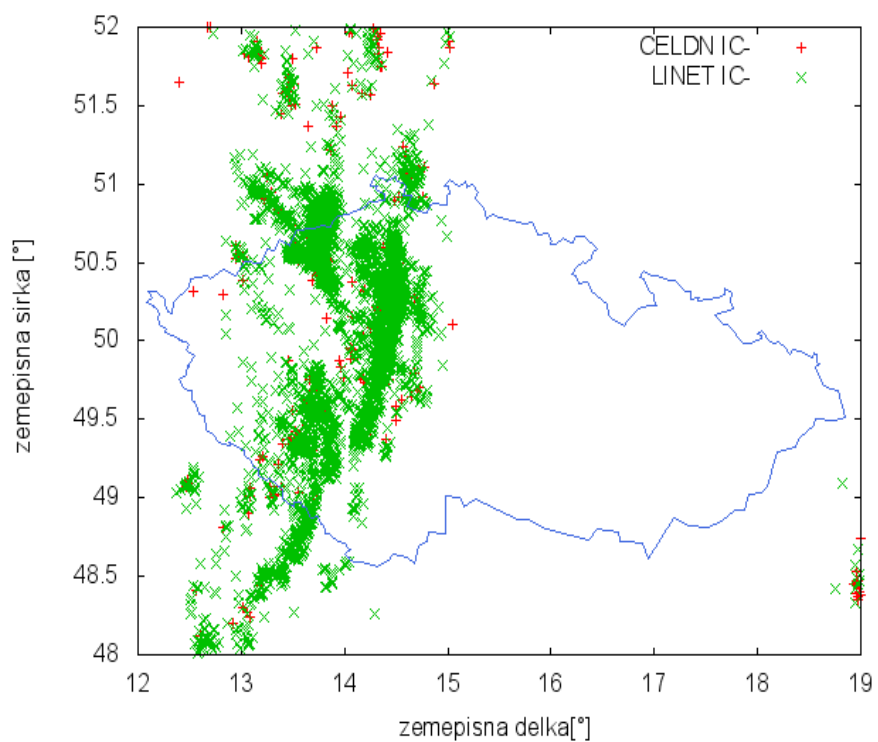
Obrázek 5.70: Pozice detekovaných CG+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 21-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



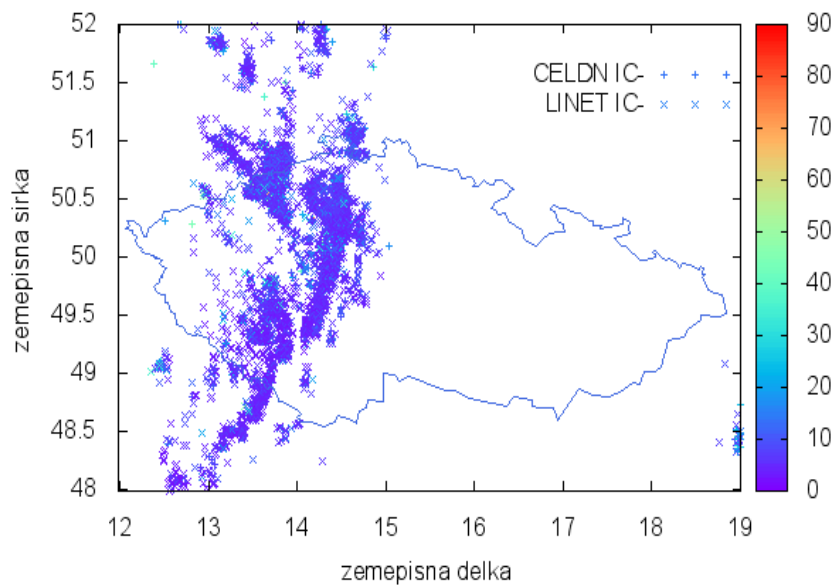
Obrázek 5.71: Pozice detekovaných IC- blesků systémem CELDN 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



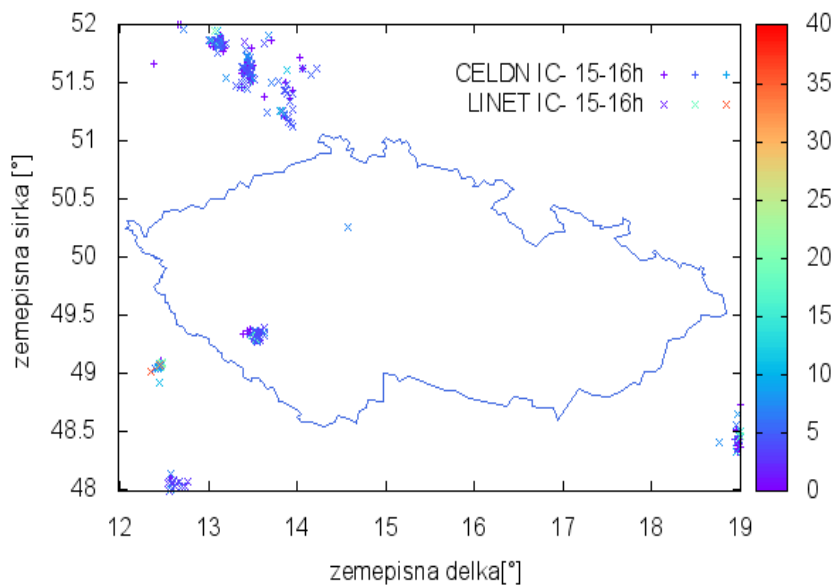
Obrázek 5.72: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



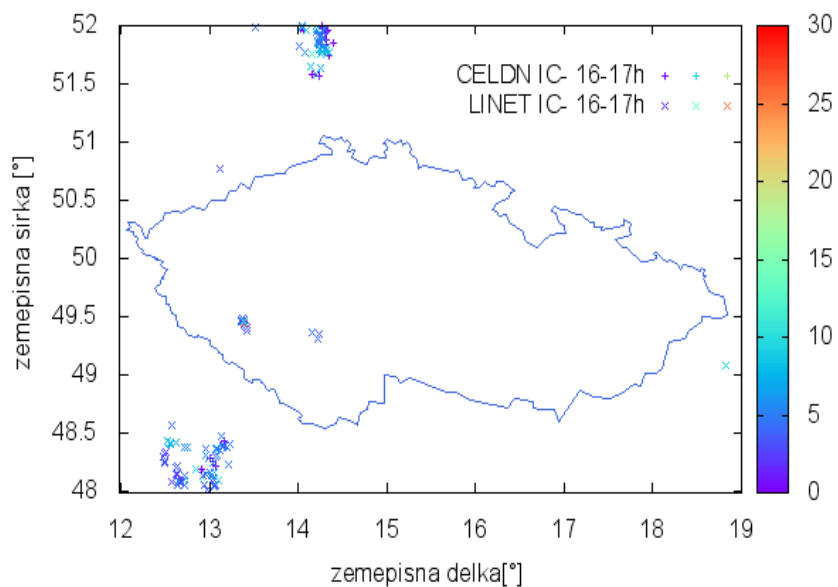
Obrázek 5.73: Pozice detekovaných IC- blesků systémy CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



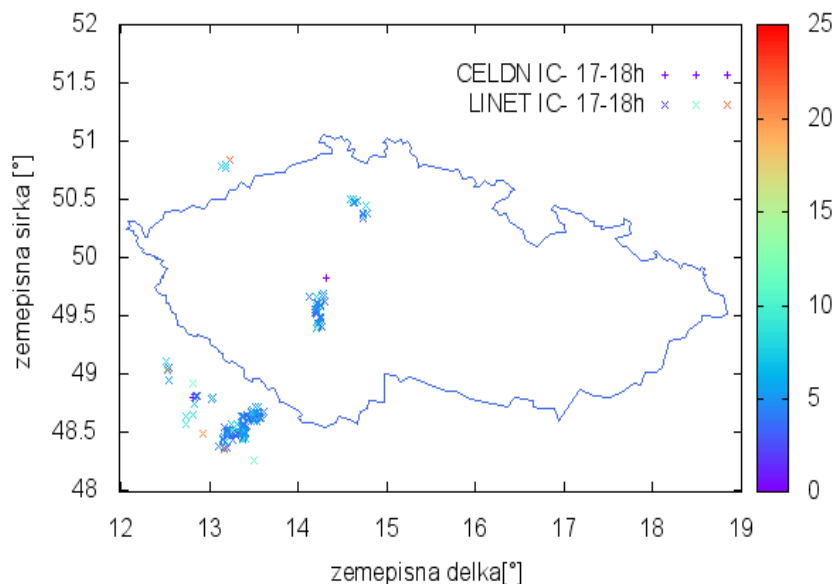
Obrázek 5.74: Pozice detekovaných bleskových výbojů IC- systému CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



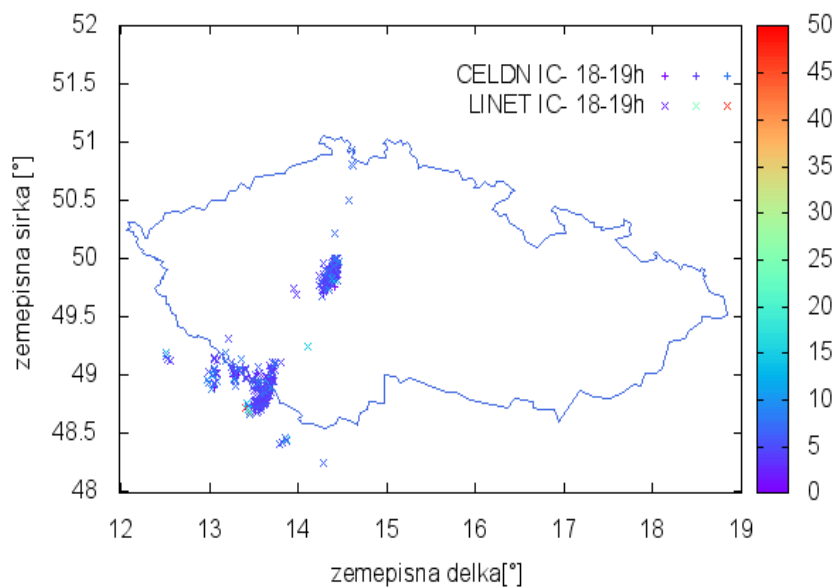
Obrázek 5.75: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 15-16h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



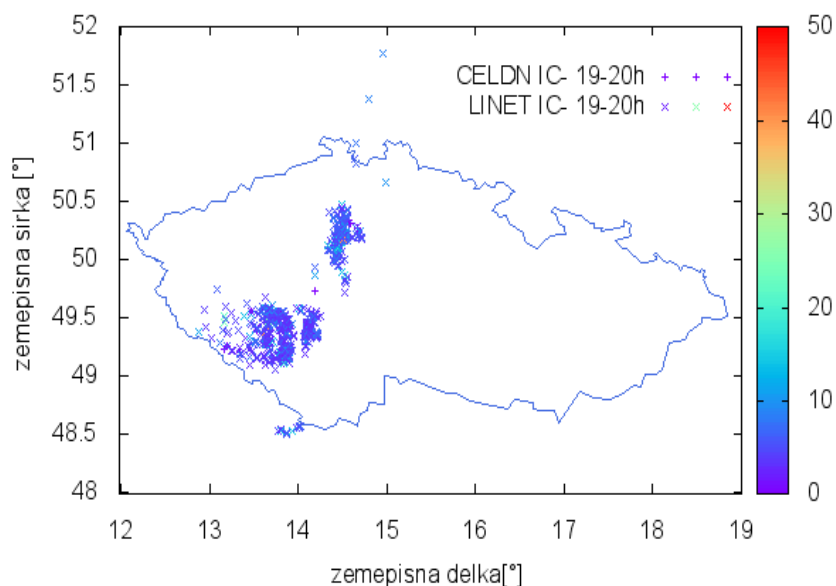
Obrázek 5.76: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 16-17h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



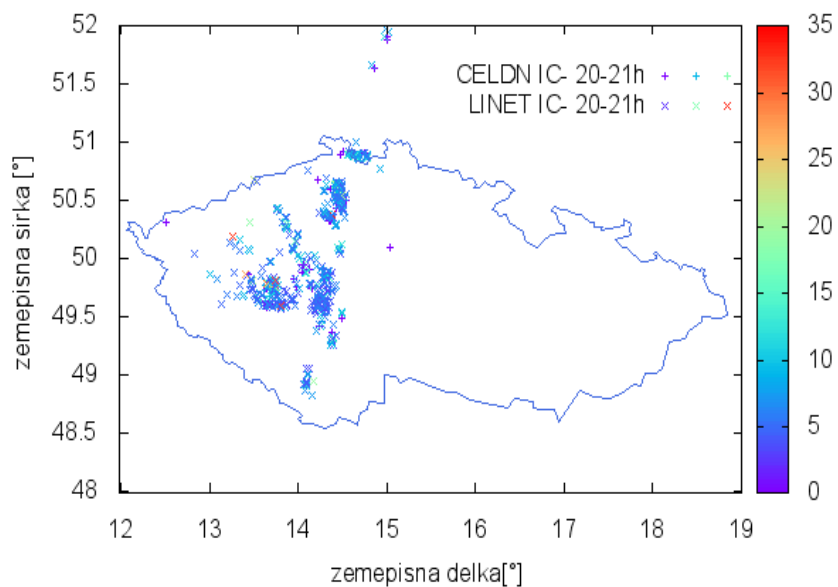
Obrázek 5.77: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 17-18h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



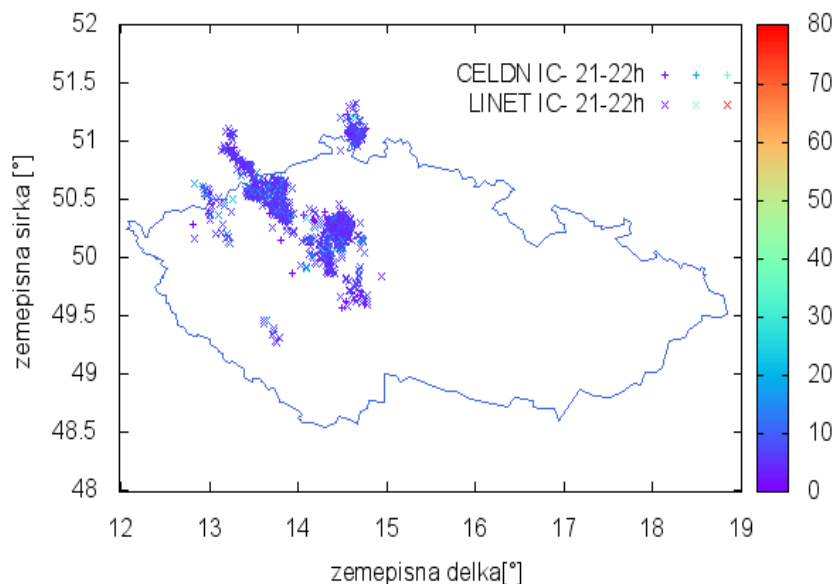
Obrázek 5.78: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 18-19h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



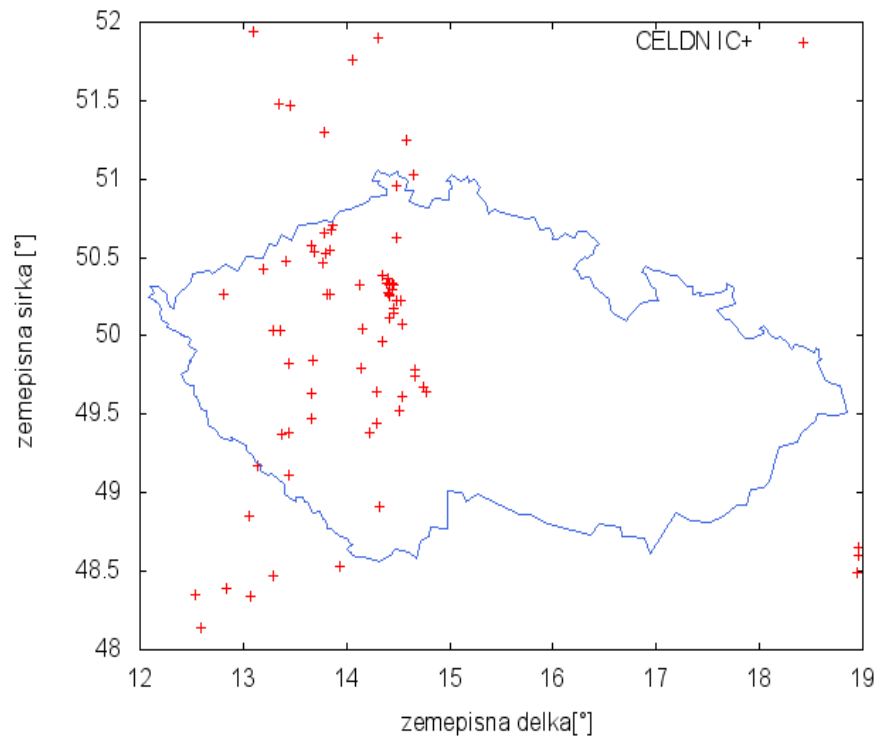
Obrázek 5.79: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 19-20h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



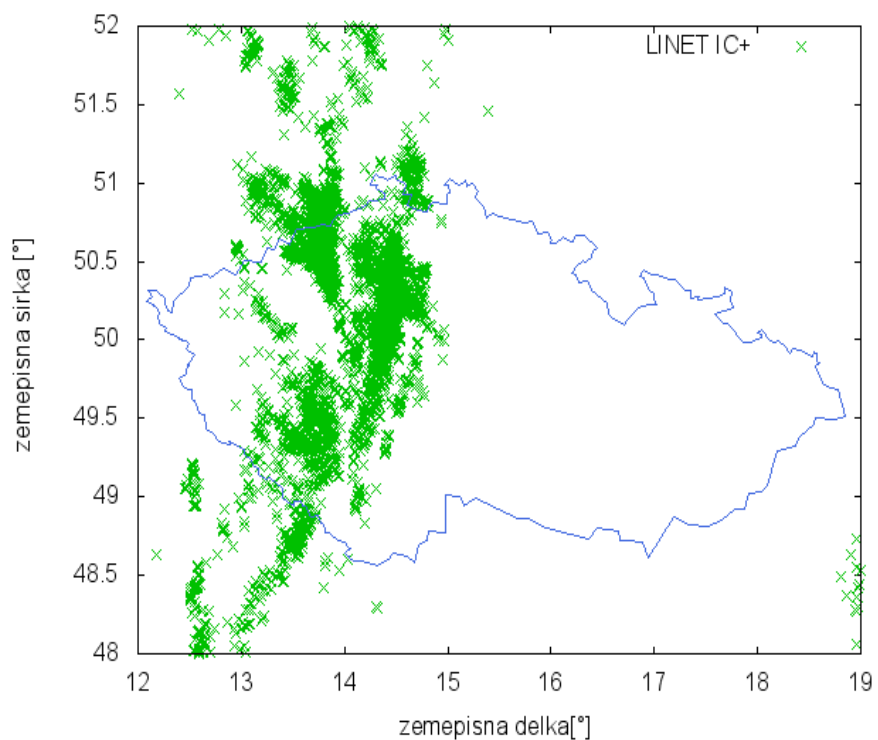
Obrázek 5.80: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 20-21h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



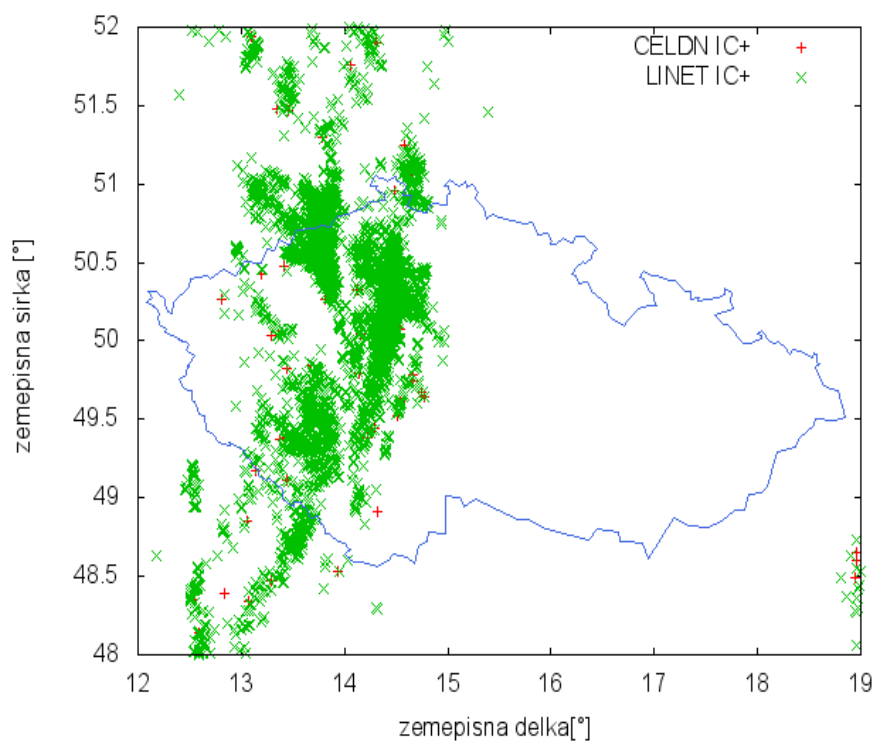
Obrázek 5.81: Pozice detekovaných IC- blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 21-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



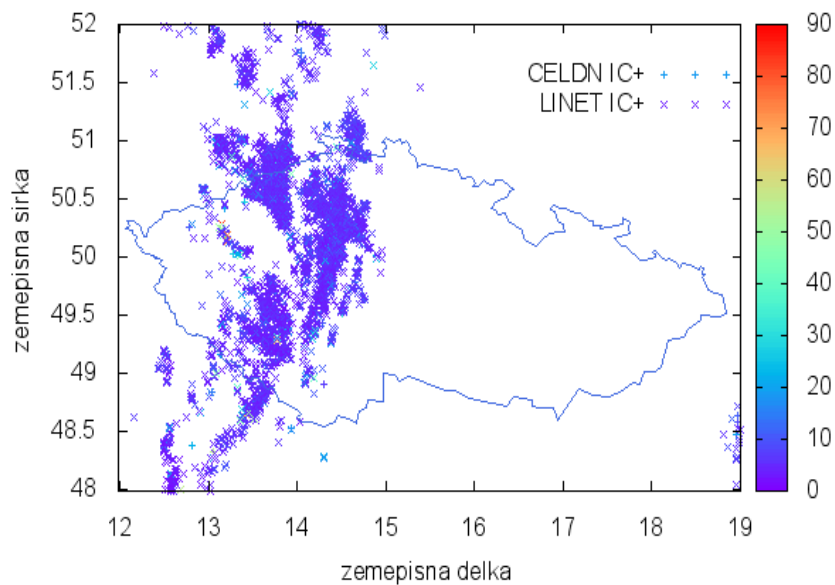
Obrázek 5.82: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem CELDN 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



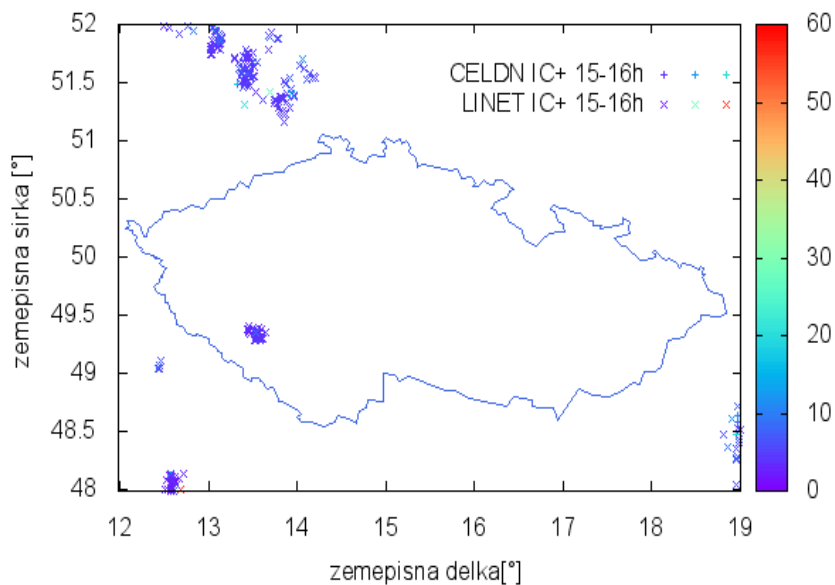
Obrázek 5.83: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



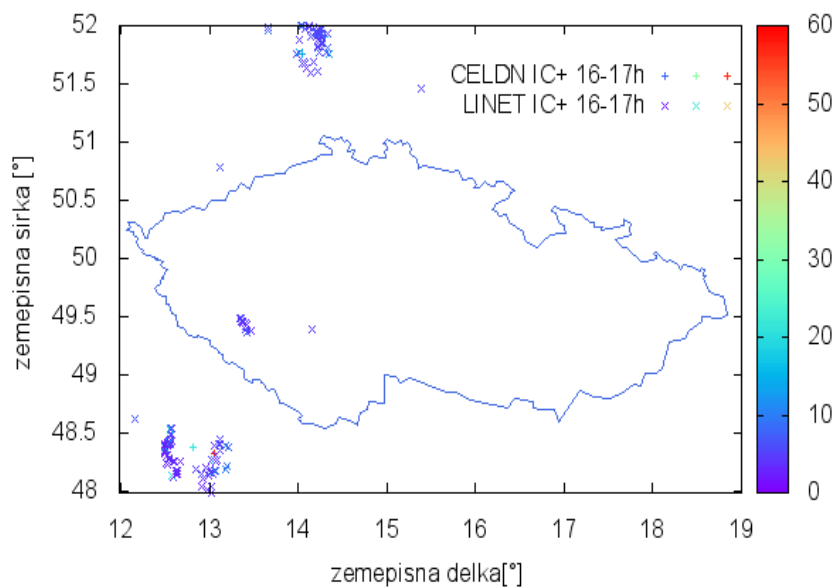
Obrázek 5.84: Pozice detekovaných IC+ blesků systémy CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času.



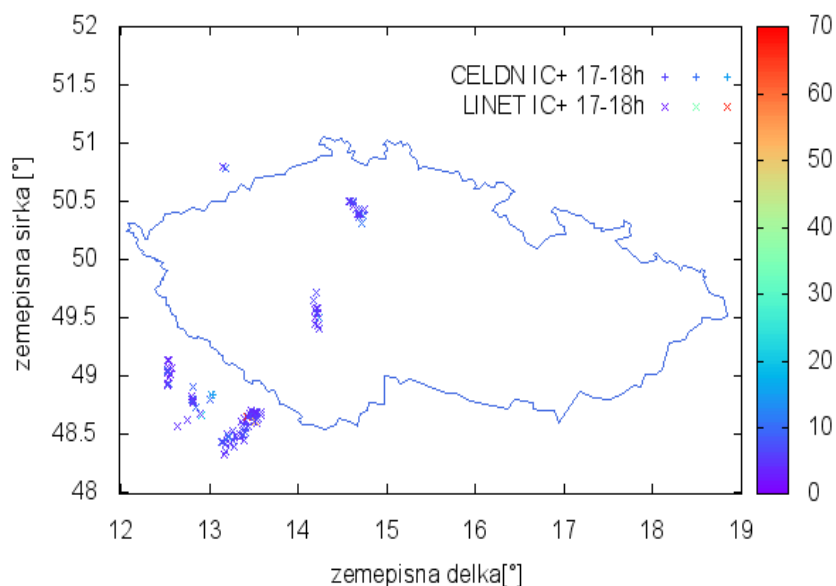
Obrázek 5.85: Pozice detekovaných bleskových výbojů IC+ systému CELDN a LINET 15.8. 2010 v rozmezí 15-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



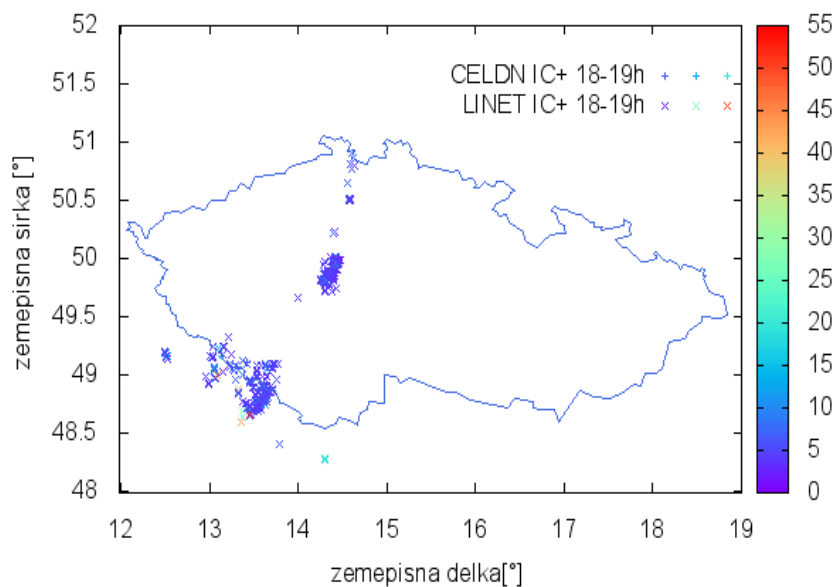
Obrázek 5.86: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 15-16h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



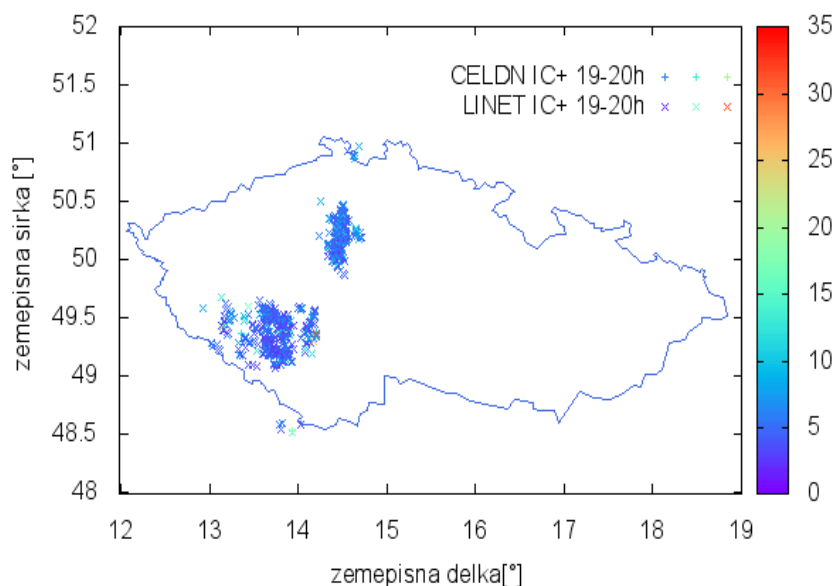
Obrázek 5.87: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 16-17h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



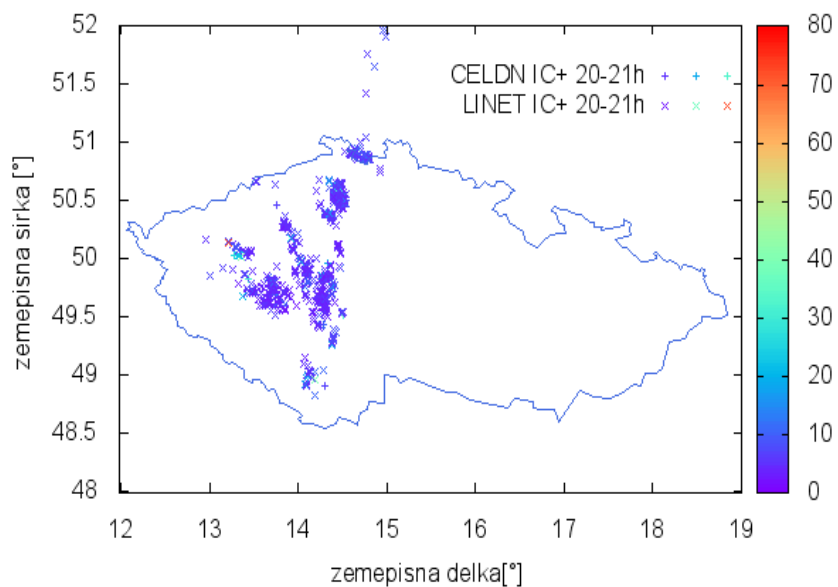
Obrázek 5.88: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 17-18h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



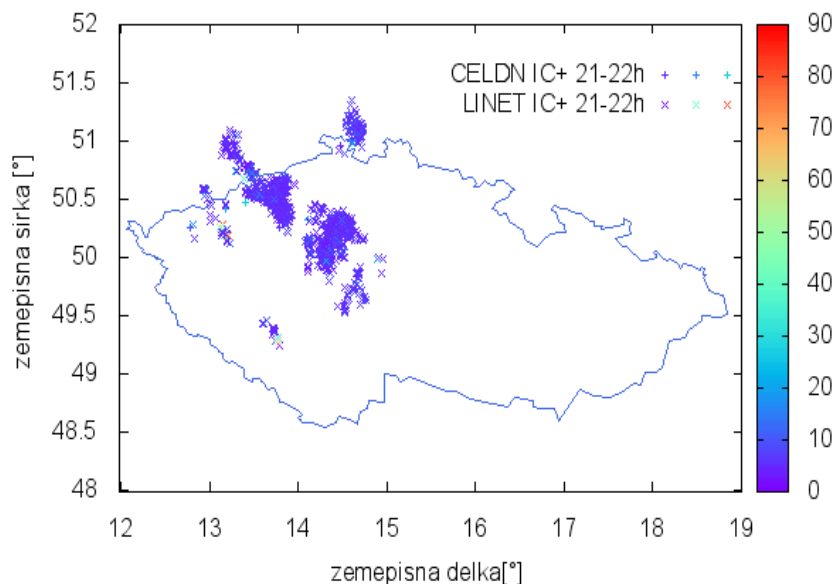
Obrázek 5.89: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 18-19h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



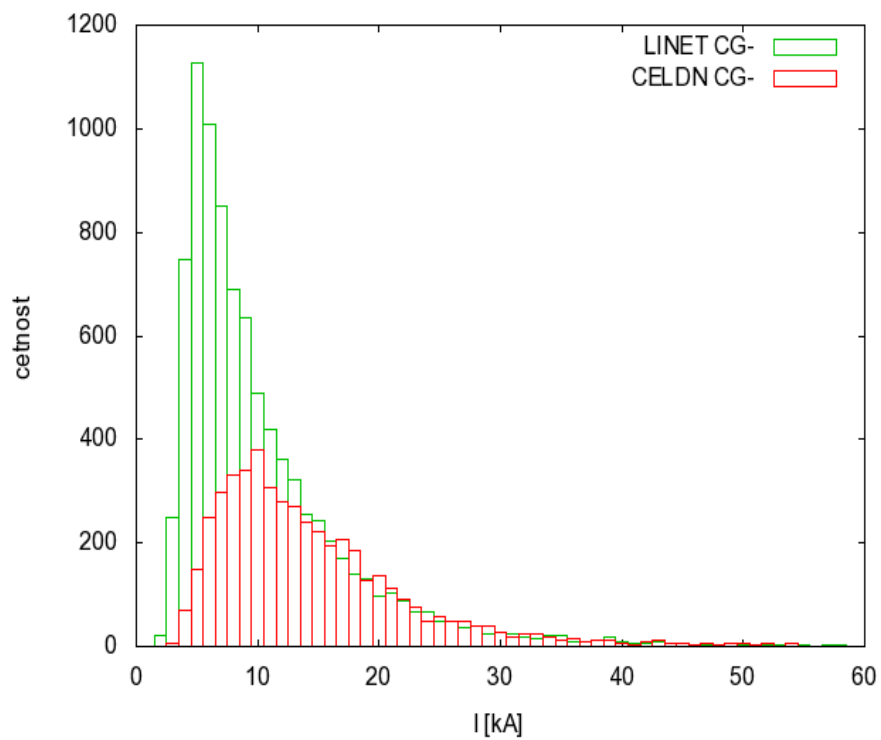
Obrázek 5.90: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 19-20h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



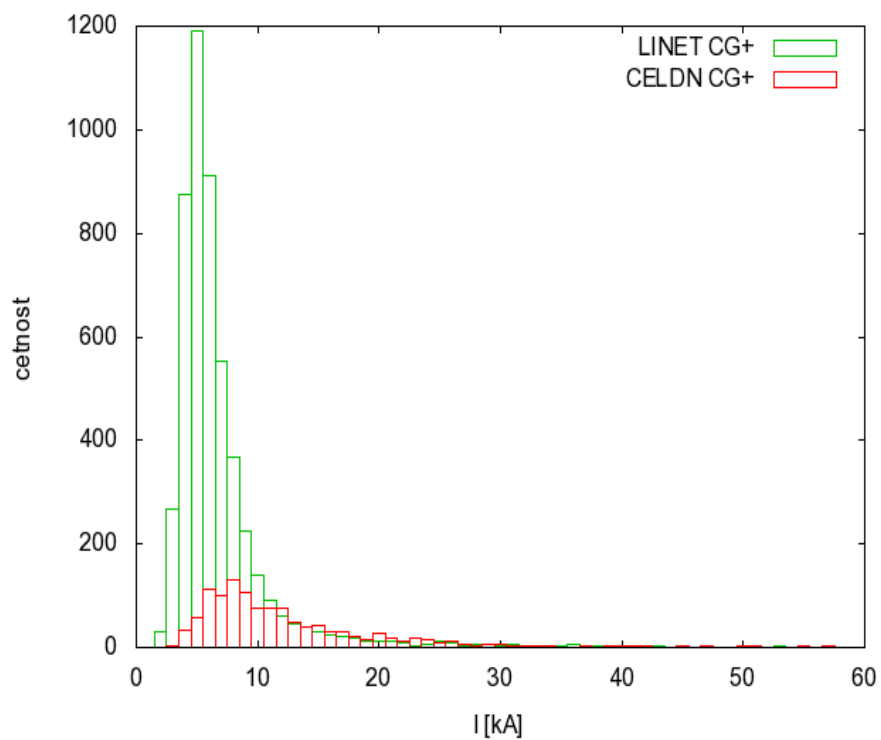
Obrázek 5.91: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 20-21h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



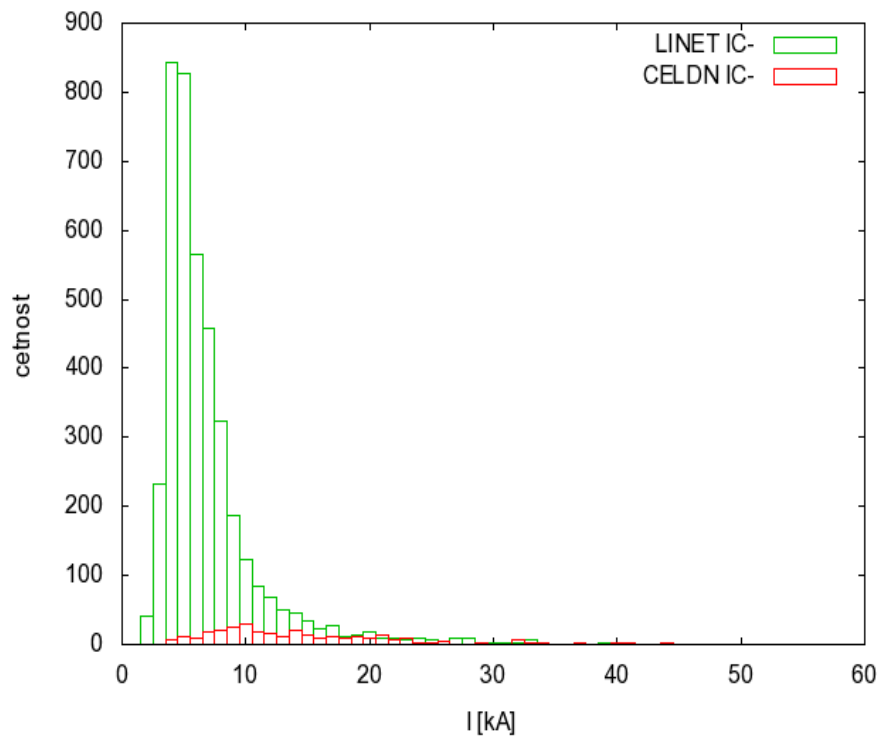
Obrázek 5.92: Pozice detekovaných IC+ blesků systémem LINET 15.8. 2010 v rozmezí mezi 21-22h místního času. Barevná škála značí proudovou amplitudu v kA .



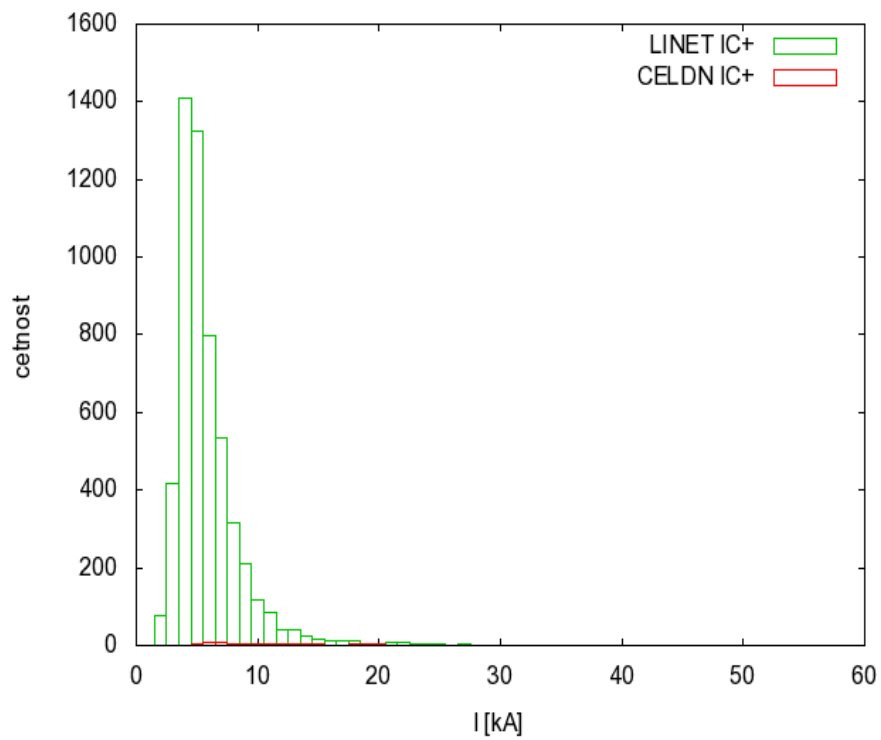
Obrázek 5.93: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG- blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2010.



Obrázek 5.94: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy CG+ blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2010.



Obrázek 5.95: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC- blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2010.



Obrázek 5.96: Porovnání četnost bleskových výbojů v závislosti na odhadu proudové amplitudy IC+ blesků pro systémy CELDN a LINET 15.8. 2010.