

Uputa za mjerenje razine elektromagnetskog polja 5G NR mreža pokretnih komunikacija

Uvod

Mjerenje razine elektromagnetskih polja 5G NR baznih postaja postaje sve važnije s obzirom na dostupnost ove tehnologije, odnosno njenu zastupljenost u svakodnevnom životu. Redovito praćenje razina izloženosti elektromagnetskim poljima, javna objava mjernih rezultata kao i opis mjerne procedure pomaže u očuvanju povjerenja u sigurnost novih tehnologija, te jača povjerenje građana u institucije koje u Republici Hrvatskoj imaju zadaću brinuti o usklađenosti tehničkih parametara, te utjecaju rada mreža pokretnih komunikacija na zdravlje ljudi.

Za razliku od prethodnih generacija mobilnih mreža, 5G NR koristi napredne tehnike poput dinamičkog oblikovanja snopa (eng. *beamforming*) i masivnog MIMO-a, čime se povećava učinkovitost sustava, ali se istovremeno usložnjava mjerenje razine elektromagnetskog polja. Stoga je nužno primjenjivati one mjerne procedure (jednu ili više njih) koje će omogućiti određivanje objektivne razine elektromagnetskog polja. Budući da izmjerena razina električnog polja, osim o primijenjenoj metodi mjerenja, u velikoj mjeri ovisi i o lokaciji mjerenja, a kako bi se izmjerila maksimalna izloženost građana elektromagnetskim poljima, mjerenje je nužno provesti na lokacijama gdje ljudi obitavaju, a na kojima se očekuju maksimalne razine elektromagnetskih polja (npr. terase zgrada, balkoni, posljednje etaže stambenih jedinica, itd.)

Temeljem članka 6. stavka 3. Pravilnika o posebnim uvjetima postavljanja i uporabe radijskih postaja (NN br. 72/23), Hrvatska regulatorna agencija za mrežne djelatnosti (dalje: HAKOM) ovlaštena je, na svojim internetskim stranicama, objaviti metode i postupke izračuna i mjerenja veličina elektromagnetskog polja. Predmetna mjerenja se provode s ciljem provjere usklađenosti razina elektromagnetskih polja 5G NR baznih postaja s dozvoljenim razinama koje je Ministarstvo zdravstva Republike Hrvatske propisalo Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja (NN br. 146/14, 59/16 i 31/19). Ova uputa primarno se odnosi na pravne osobe koje su sukladno članku 6. stavku 2. Pravilnika o posebnim uvjetima postavljanja i uporabe radijskih postaja ishodile ovlaštenje HAKOM-a za obavljanje poslova izračuna i mjerenja veličina elektromagnetskog polja. Cilj je ove upute ujednačiti mjeriteljsku praksu te osigurati da dobiveni rezultati budu međusobno usklađeni i usporedivi. Kako bi se osigurala šira primjenjivost i dosljednost u provedbi mjerenja, preporučuje se primjena ove upute, kao stručne referentne osnove, i drugim dionicima. Za sve one uvjete primjene pojedine metode koji nisu navedeni u ovom preglednom tekstu, uključujući i uvjete pod kojima je nužno provesti mjerenja, potrebno je koristiti smjernice u skladu s relevantnim normama i preporukama (npr. HRN EN IEC62232, ECC/REC/(02)04, itd.).

Pregled metoda

Prema dostupnoj stručnoj literaturi može se zaključiti da se za procjenu izloženosti elektromagnetskim poljima 5G NR baznih postaja najčešće koriste: kodno-selektivna metoda i frekvencijski-selektivna metoda. Odabir odgovarajuće metode mjerenja ovisi o svrsi mjerenja, specifičnim uvjetima provedbe te dostupnim tehničkim parametrima. U tom kontekstu, ukoliko način ili metoda mjerenja nije izričito definirana propisima ili drugim obvezujućim aktima, odabir metode ovisi o stručnoj procjeni mjeritelja. Način primjene kodno-selektivne metode i frekvencijski-selektivne metode detaljnije je opisan niže u ovom preglednom tekstu.

A. Kodno-selektivna metoda

Kodno-selektivna metoda temelji se na mjerenju razine sinkronizacijskog signala, koji se naknadnom obradom ekstrapolira na **teoretsku maksimalnu razinu električnog polja bazne postaje**. Prednost primjene ove metode očituje se u njezinoj neovisnosti o trenutnom podatkovnom, odnosno korisničkom, opterećenju mreže. Međutim, preduvjet za njezinu primjenu je da operator mreža pokretnih komunikacija učini dostupnim sve parametre koji su nužni za izračun ekstrapolacijskog faktora.

Za određivanje razine zračenja primjenom kodno-selektivne metode potrebno je:

1. Izmjeriti razinu električnog polja po resursnom elementu ($E_{SSB,RE}$; SS-RSRP)
2. Kako bi se odredila teoretska maksimalna vrijednost električnog polja bazne postaje na predmetnoj lokaciji, izmjerenu vrijednost $E_{SSB,RE}$ potrebno je pomnožiti sa ekstrapolacijskim faktorom kao što je definirano izrazom (1):

$$E_{uk} = E_{SSB,RE} [V/m] \cdot \sqrt{F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC} \cdot F_{ant} \cdot F_B^{-1}} [V/m] \quad (1)$$

gdje je:

- F_{BW} : korekcijski faktor određen širinom frekvencijskog kanala i razmakom između podnosioca (tablica 1 i 2)
- F_{PR} : faktor smanjenja snage
- F_{TDC} : korekcijski faktor koji ovisi o primijenjenoj tehnici dupleksiranja (TDD/FDD)
- F_{ant} : korekcijski faktor oblikovanja antenskog snopa
- F_B : korekcijski faktor povećanje snage referentnog signala u odnosu na podatkovni signal (eng. SSB *boosting factor*).

SCS [kHz]	5 [MHz]	10 [MHz]	15 [MHz]	20 [MHz]	25 [MHz]	30 [MHz]	40 [MHz]
15	300	624	948	1272	1596	1920	2592
30	132	288	456	612	780	936	1272
60	-	132	216	288	372	456	612

Tablica 1. Vrijednosti korekcijskog faktora F_{BW} za širinu kanala od 5 MHz do 40 MHz i SCS od 15 kHz, 30 kHz i 60 kHz

SCS [kHz]	50 [MHz]	60 [MHz]	70 [MHz]	80 [MHz]	90 [MHz]	100 [MHz]
15	3240	-	-	-	-	-
30	1596	1944	2268	2604	2940	3276
60	780	948	1116	1284	1452	1620

Tablica 2. Vrijednosti korekcijskog faktora F_{BW} za širinu kanala od 50 MHz do 100 MHz i SCS od 15 kHz, 30 kHz i 60 kHz

2.1. Ukoliko operator pokretnih komunikacijskih mreža na svojim baznim postajama ima implementirani brojač za nadzor i mehanizam za kontrolu EIRP-a, odnosno koristi korektivni faktor snage, isti se treba uzeti u obzir prilikom izračuna trenutne maksimalne izračene snage. Korektivni faktor snage (F_{PR}) izvodi se iz statičke analize tj. kumulativne funkcije raspodjele (CDF) vremenski uprosječene izračene snage. Primjenom korektivnih faktora osigurava se da se u procjenu izloženosti elektromagnetskim poljima baznih postaja, odnosno prilikom određivanja granica usklađenosti, u obzir uzme trenutna vremenski uprosječena izračena snaga bazne postaje. Vrijednosti korektivnih faktora¹ (faktor smanjenja snage) u ovisnosti o broju primopredajnih elemenata antene, za tri proizvođača radijske opreme, dane su u tablicama 3, 4 i 5.

Broj primopredajnih elemenata /(TRX)	Korektivni faktor (F_{PR})
≥ 16	≥ 0.32
8-15	≥ 0.40
1-7	1

Tablica 3. Ericsson Nikola Tesla korektivni faktori za adaptivne antenske sustave ovisno o broju TRX primopredajnih elemenata

Broj primopredajnih elemenata /(TRX)	Korektivni faktor (F_{PR})
≥ 64	≥ 0.13
32-63	≥ 0.20
16-31	≥ 0.32
8-15	≥ 0.50
1-7	1

Tablica 4. Huawei korektivni faktori za adaptivne antenske sustave ovisno o broju TRX primopredajnih elemenata

¹ Vrijednosti korektivnih faktora koje su navedene u Tablicama 3-5 temelje se na trenutno dostupnim informacijama te kao takvi ne preferiraju niti jednog proizvođača radijske oprema.

Broj primopredajnih elemenata /(TRX)	Korektivni faktor (F_{PR})
32-64	≥ 0.33
8	0.5

Tablica 5. Nokia korektivni faktori za adaptivne antenske sustave ovisno o broju TRX primopredajnih elemenata

Za antenske sustave bez mogućnosti formiranja antenskog snopa, odnosno kada operator mreža pokretnih komunikacija na svojim baznim postajama nema implementirani brojač za nadzor i mehanizam za kontrolu EIRP-a, vrijednost korekcijskog faktora F_{PR} iznosi $F_{PR}=1$.

2.2. Korekcija zbog primjene tehnike dupleksiranja s vremenskom podjelom (TDD) provodi se zbog podjele upotrebe radnog kanala u vremenskoj domeni između silazne veze (npr. 75% vremena) i uzlazne veze (npr. 25% vremena). Ukoliko je 75% vremena trajanja okvira dodijeljeno silaznoj vezi tada TDD korekcijski faktor iznosi $F_{TDC} = 0.75$. U slučaju primjene tehnike dupleksiranja s frekvencijskom podjelom (FDD) tada je $F_{TDC} = 1$.

2.3. Korekcija zbog oblikovanja antenskog snopa (F_{ant}) provodi se zbog razlike između sinkronizacijskog i podatkovnog dijagrama zračenja antene (horizontalnog i vertikalnog dijagrama zračenja). Izračun se provodi na temelju podataka iz dijagrama zračenja predmetne antene na način da se odredi položaj mjerne lokacije u odnosu na predajnu antenu, uzimajući u obzir da se usmjerenje određuje od antenskog sustava prema lokaciji mjerenja. Prilikom određivanja F_{ant} korekcijskog parametra izuzetno je važno precizno odrediti poziciju prijemne antene u odnosu na predmetnu baznu postaju (geometrija prostora), budući da i mala pogreška prilikom određivanja geometrije prostora može uzrokovati veliko odstupanje parametra F_{ant} , odnosno odstupanja u procjeni izloženosti elektromagnetskim poljima. Ukoliko je izvor elektromagnetskog polja pasivni antenski sustav tada je $F_{ant} = 1$.

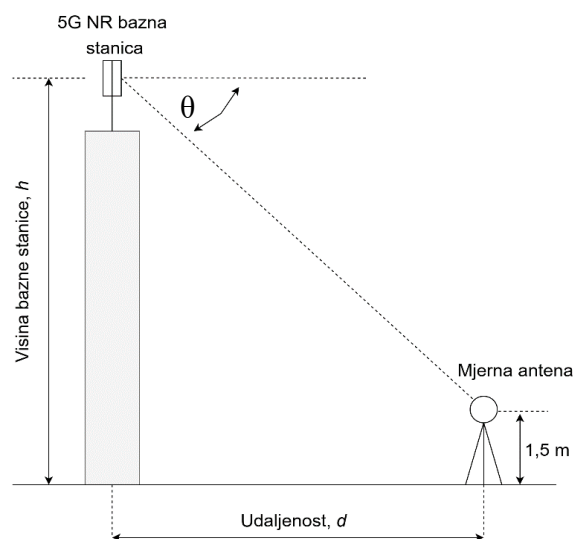
2.4. Povećanje snage referentnog signala u odnosu na podatkovni signal definiran je izrazom F_B . Ukoliko operator mreža pokretnih komunikacija nije dostavio drugačiju (stvarno postavljenu) vrijednost korekcijskog parametra F_B , vrijednost istog prilikom izračuna ekstrapolacijskog faktora treba biti $F_B=1$ ($F_{B(dB)}=0$ dB).

Primjer:² Pretpostavimo da su zadani sljedeći parametri:

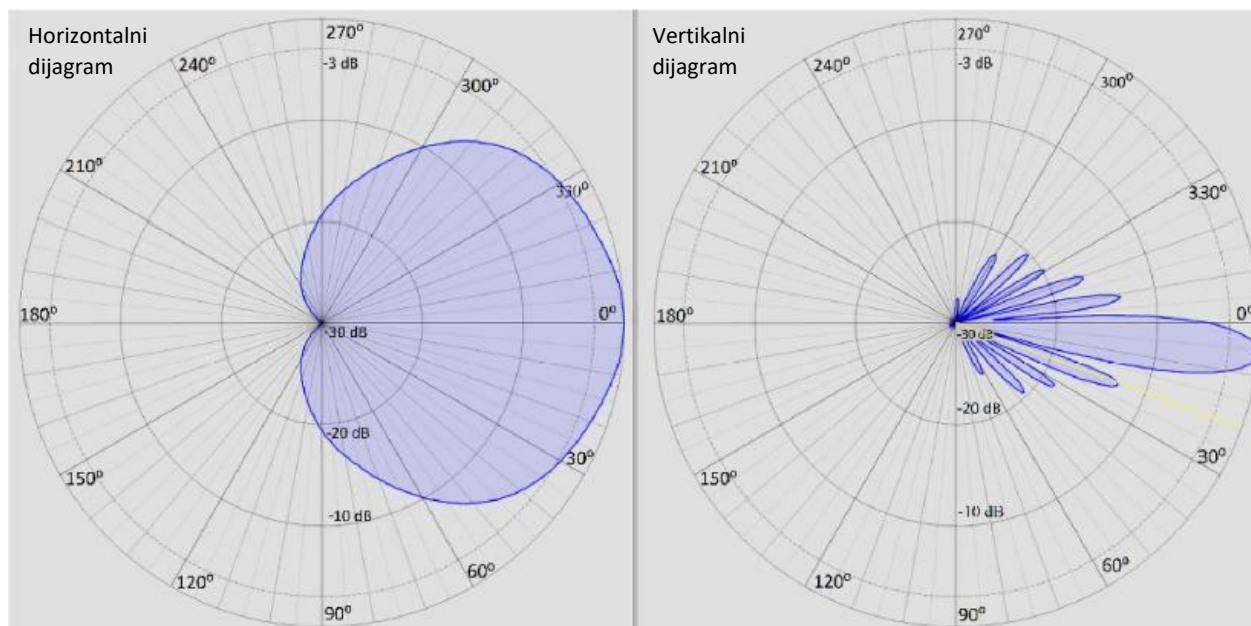
- udaljenost između lokacije mjerenja i bazne postaje: $d=70$ m
- visina predajne antene: $h=27$ m
- horizontalni kut (prema lokaciji mjerenja): $\varphi=2^\circ$
- vertikalni kut (prema lokaciji mjerenja): $\theta=21^\circ$
- maksimalno pojačanje sinkronizacijskog snopa: $G_{\max, SSB}=17.1$ dBi
- maksimalno pojačanje podatkovnog snopa: $G_{\max, TB}=23.8$ dBi

² Prikazani primjer izračuna isključivo je ilustrativan te ne predstavlja tipičan niti nužno najnepovoljniji scenarij izloženosti elektromagnetskim poljima, već isključivo služi za objašnjenje primjene kodno-selektivne metode.

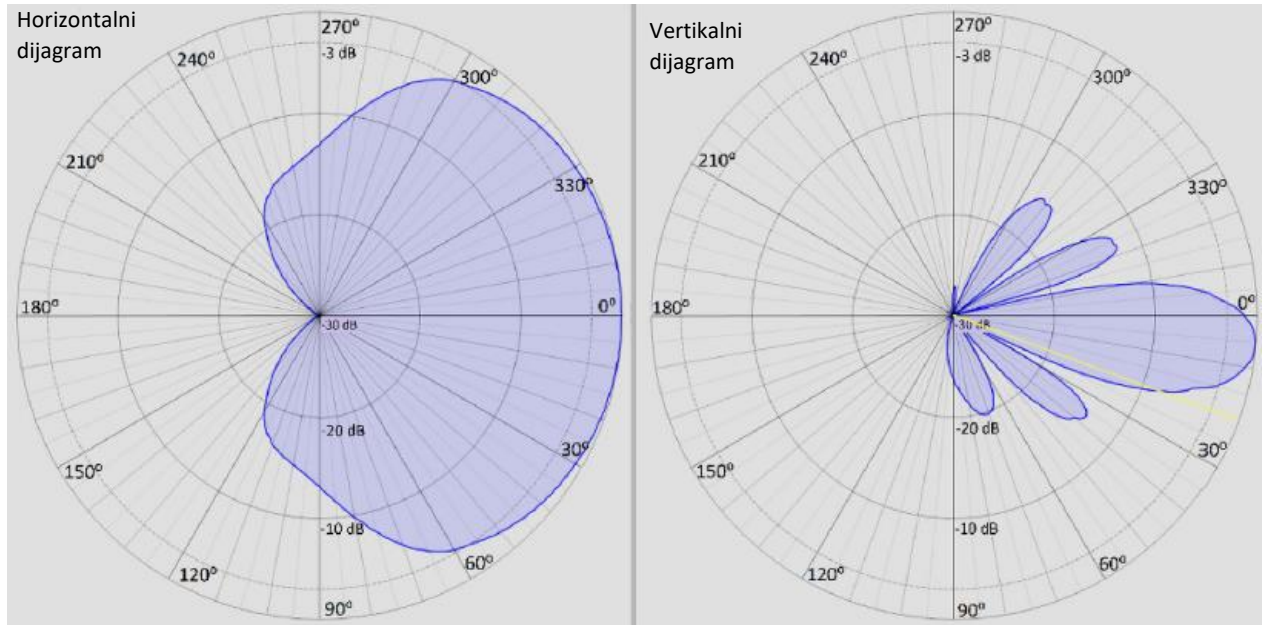
- izmjerena vrijednost električnog polja resursnog elementa: $E_{SSB,RE}=0.05$ V/m
- korekcija zbog primjene tehnike dupleksiranja: $F_{TDC}=0.75$
- ukupan broj podnosioca: $F_{BW}=3276$
- SSB „boosting“ faktor: $F_B=4$ dB



Slika 1. Postav mjerenja



(a)



(b)

Slika 2. Dijagram antene: a) sinkronizacijski snop i b) podatkovni snop za $\theta=20^\circ$ i $\varphi=2^\circ$

Na temelju dijagrama zračenja koji su prikazani na slici 2 vrijednost korekcijskog faktora zbog oblikovanja antenskog snopa (F_{ant}) može se izračunati na sljedeći način:

$$G_{SSB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} = G_{\max, SSB} - G_{V_SSB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} - G_{H_SSB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} = 17.1 - 12.7 - 0.02 = 4.2 \text{ dBi} \quad (2)$$

$$G_{TB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} = G_{\max, TB} - G_{V_TB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} - G_{H_TB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} = 23.8 - 8.12 - 0 = 15.6 \text{ dBi} \quad (3)$$

$$F_{ant_dB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} = G_{TB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} - G_{SSB(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} = 15.6 - 4.2 = 11.4 \text{ dB} \quad (4)$$

$$F_{ant(\varphi=2^\circ, \theta=20^\circ)} = 10^{(11.4/10)} = 13.8 \quad (5)$$

Teoretska maksimalna vrijednost električnog polja dobije se umnoškom izmjere vrijednosti parametra $E_{SSB,RE}$ s ekstrapolacijskim faktorima (uz pretpostavku da je $F_{PR}=1$) prema izrazu (1):

$$\begin{aligned} E_{uk} &= E_{SSB,RE} \cdot \sqrt{\frac{F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC} \cdot F_{ant}}{F_B}} \\ &= 0.05 \cdot \sqrt{\frac{3276 \cdot 1 \cdot 0.75 \cdot 13.8}{2.51}} \\ &= 5.8 \text{ V/m} \end{aligned} \quad (6)$$

B. Frekvencijski-selektivna metoda

Frekvencijski-selektivna metoda često se koristi kada je potrebno utvrditi trenutnu razinu elektromagnetskog polja baznih postaja. Ova metoda jednostavna je za primjenu, a temelji se na mjerenju razine električnog polja 5G NR radnog frekvencijskog kanala.

Prilikom primjene frekvencijski-selektivne metode s ciljem određivanja izloženosti elektromagnetskog polja 5G NR bazne postaje, potrebno je:

1. Tijekom mjerenja razine električnog polja mjeritelj mora kontinuirano pobuđivati baznu postaju. Za ostvarenje potrebnog pobuđivanja nužno je koristiti 5G uređaj te pripadajuće aplikacije koje uzrokuju maksimalno opterećenje bazne postaje (npr. speed test aplikacije: fast.com, iPerf, itd.).
2. Pobuđivanje bazne postaje potrebno je obaviti s prijenosnim terminalom na udaljenosti od otprilike 1,5 m od prijemne antene kako bi se onemogućio utjecaj uzlazne veze (prijenosni terminal-bazna postaja) na rezultat mjerenja.
3. Postavke analizatora spektra:
 - ako operator koristi mehanizam kontrole izračene snage: f_{centar} , Span=100 MHz, RMS detektor, Trace: AVG³
 - ako operator ne koristi mehanizme kontrole izračene snage: f_{centar} , Span=100 MHz, RMS detektor, Trace: Max Hold

Zbog činjenice da je vrijednost mjerenog električnog polja primjenom frekvencijski-selektivne metode ovisna o trenutnom prometu u predmetnoj 5G NR baznoj postaji, ova metoda ima ograničenu primjenjivost u slučajevima kada se želi odrediti teoretski maksimalna razina zračenja bazne postaje.

Zaključak

Frekvencijski-selektivna metoda, zbog metodološke jednostavnosti, neovisnosti o detaljnim tehničkim parametrima predmetnog radijskog sustava te operativnoj učinkovitosti, često je preferirani izbor pri procjeni izloženosti elektromagnetskim poljima 5G NR baznih postaja. Međutim, s obzirom da su rezultati ove metode uvjetovani trenutnim opterećenjem 5G NR bazne postaje, njezina je primjenjivost ograničena u slučajevima kada se želi odrediti teoretska maksimalna razina elektromagnetskog polja.

S druge strane, kodno-selektivna metoda, osim samog mjerenja, zahtjeva i dodatnu obradu prikupljenih podataka. Njena pouzdanost u znatnoj mjeri ovisi o točnosti parametara koji su dobiveni terenskim mjerenjem odnosno točnosti parametara dostavljenim od operatora mreža pokretnih komunikacija. Čak i manja odstupanja pojedinih parametara sustava od njihovih stvarnih vrijednosti

³ Koristiti u slučajevima kada operator mreža pokretnih komunikacija koristi programski/sklopovski mehanizam kontrole izračene snage (eng. power counters/controls) kako bi se izbjeglo moguće preuveličavanje vrijednosti razine elektromagnetskog polja. Mjerenje je potrebno provesti u vremenskom intervalu definiranim Preporukom: HRN EN IEC62232.

mogu imati značajan utjecaj na procjenu izloženosti elektromagnetskim poljima bazne postaje. Međutim, iako je metodološki zahtjevnija, ova metoda, uz pretpostavku točno određene geometrije prostora, omogućava najtočniju procjenu scenarija najnepovoljnije izloženosti te je osobito korisna u slučajevima kada postoji povećani rizik od ukupne izloženosti elektromagnetskim poljima.

Primjena pojedine metode na pojedinoj lokaciji ovisi o procjeni i iskustvu samoga mjeritelja, osim u slučajevima kada je odabir metode mjerenja izričito propisan važećim propisima ili drugim obvezujućim aktima. Slijedom navedenog, kod mjerenja razine elektromagnetskog polja 5G NR baznih postaja, pod uvjetom da je geometrija prostora točno određena te da su mjeritelju dostupni precizni tehnički podaci potrebni za provedbu metode, uporaba kodno-selektivne metode može biti osobito primjerena u slučajevima kada je ukupna izloženost elektromagnetskim poljima blizu graničnog uvjeta propisanog za istodobno djelovanje elektromagnetskih polja više različitih frekvencija.

Popis kratica:

CDF : kumulativna funkcija raspodjele

d : udaljenost između lokacije mjerenja i bazne postaje

$E_{SSB,RE}$: razina električnog polja po resursnom elementu

E_{uk} : teoretska maksimalna vrijednost električnog polja

F_{ant} : korekcijski faktor oblikovanja antenskog snopa

F_B : korekcijski faktor povećanja snage referentnog signala u odnosu na podatkovni signal

F_{BW} : korekcijski faktor određen širinom frekvencijskog kanala i razmakom između podnosioca

FDD: dupleksiranje s frekvencijskom podjelom

F_{PR} : faktor smanjenja snage

F_{TDC} : korekcijski faktor koji ovisi o primijenjenoj tehnici dupleksiranja (TDD/FDD)

$G_{max, SSB}$: maksimalno pojačanje sinkronizacijskog snopa

$G_{max, TB}$: maksimalno pojačanje podatkovnog snopa

h : visina predajne antene

MIMO: antene s višestrukim ulazom i višestrukim izlazom

SCS: razmak između podnosioca

TDD: dupleksiranje s vremenskom podjelom

θ : vertikalni kut (prema lokaciji mjerenja)

φ : horizontalni kut (prema lokaciji mjerenja)