

УДК 681.515.8

С.А. Губіш, Н.В. Здолбіцька, А.П. Здолбіцький  
Луцький національний технічний університет**ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРІ**

**С.А. Губіш, Н.В. Здолбіцька, А.П. Здолбіцький. Поширення сигналу на відкритому просторі.** Наведено відомості про поширення радіосигналу на відкритому просторі, а також розглянуто особливий випадок – відбиття хвилі від поверхні землі. Здійснено практичну реалізацію та вимірювання рівня сигналу на відкритому просторі.

**Ключові слова:** сигнал, хвиля, антена, радіопередавач, CC2500, рівняння Фрііс.

**Форм. 4. Рис. 4. Літ. 10.**

**С.А. Губиш, Н.В. Здолбицкая, А.П. Здолбицкий. Распространение сигнала на открытом пространстве.** Приведены сведения о распространении радиосигнала на открытом пространстве, а также рассмотрен особый случай – отражение волны от поверхности земли. Осуществлена практическая реализация и измерения уровня сигнала на открытом пространстве.

**Ключевые слова:** сигнал, волна, антенна, радиопередатчик, CC2500, уравнение Фриис.

**S.A. Hubish, N.V. Zdobitska, A.P. Zdobitsky. Signal propagation in open space.** Information on radio propagation in the open air, and considered a special case – the wave reflection from the surface was described. Practical implementation and measurement of signal level in the open air environment was done.

**Keywords:** signal, wave, antenna, radio, CC2500, Friis equation.

**Постановка проблеми.** Радіозв'язок ґрунтується на основі передачі енергії сигналу з одного місця в інше. Отримана енергія сигналу повинна бути достатньо великою, щоб відрізнити корисний сигнал від шуму, який завжди присутній. Ця залежність описується як відношення сигналу до шуму (S/N).

Необхідне відношення для нормального радіозв'язку зазвичай вказується у технічній документації до приймача, хоча також досить часто використовується таке поняття як чутливість – це абсолютний рівень сигналу (S). Якщо ж вказана лише чутливість, то мається на увазі, що пристрій знаходиться при кімнатній температурі і присутній лише тепловий шум.

Далі буде розглянуто теорію, що використовується для визначення радіусу поширення радіосигналу у повітрі.

**Метою роботи** є визначення радіусу дії радіопередавача, на якому можливе стабільне з'єднання, для створення стабільних бездротових мереж.

**Рівняння Фрііс.** Відстані у радіозв'язку, як правило, описуються рівнянням Фрііс (1).

$$P_R = \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^n}, \quad n = 2. \quad (1)$$

де

$P_R$  – потужність, що надходить з прийомної антени;

$P_T$  – потужність, що подається на передавальну антену;

$G_R$  – підсилення приймальної антени;

$G_T$  – підсилення передавальної антени;

$\lambda$  – довжина хвилі, де  $\lambda = c/f$ ,  $c$  – швидкість світла, і  $f$  – частота;

$d$  – відстань;

$c$  – швидкість світла у вакуумі  $299.972458 \cdot 10^6$  [м/с]

Це рівняння описує залежність між відстанню, частотою (довжиною хвилі), коефіцієнтом підсилення антени та потужністю сигналу.

**Рівень сигналу.** Рівняння Фрііс часто називають рівнянням рівня сигналу. Різницю між прийнятою потужністю сигналу ( $P_R$ ) і чутливістю приймача називають границями сигналу. У реалістичній моделі сигнал піддається додатковим втратам, що повинні бути додані до втрат, що розраховані рівнянням Фрііс.

Діапазон – це відстань, на якій можливий стабільний радіозв'язок з рівнем сигналу, що дорівнює рівню чутливості приймача. У цифрових системах радіозв'язку чутливість часто визначається як рівень вхідного сигналу.

**Відбиття від землі.** У типовій радіопередачі хвилі відбиваються і затухають при проходженні крізь об'єкти. Обчислення діапазону в реалістичному середовищі є складним

завданням, що вимагає величезних обчислювальних ресурсів. Багато середовищ включають в себе деякі мобільні об'єкти, що додають складності завданню. Більшість вимірювань діапазону виконуються на великих відкритих просторах, що не містять перешкод та інших рухомих об'єктів чи джерел радіовипромінювання. Це слід в першу чергу зробити, щоб отримати стійкі результати. Рівняння Фрііс можна застосовувати лише на вільному просторі. Звичайне обладнання зазвичай працює близько до землі. Це, звичайно, необхідно враховувати, щоб зробити достовірні розрахунки діапазону дії.

Рисунок 1 ілюструє ситуацію з нескінченною, абсолютно плоскою поверхнею землі за відсутності інших об'єктів, що перешкоджали б сигналу. Загальна отримана енергія може бути змодельована як векторна сума безпосередньо направленою сигналу та відбитого сигналу.

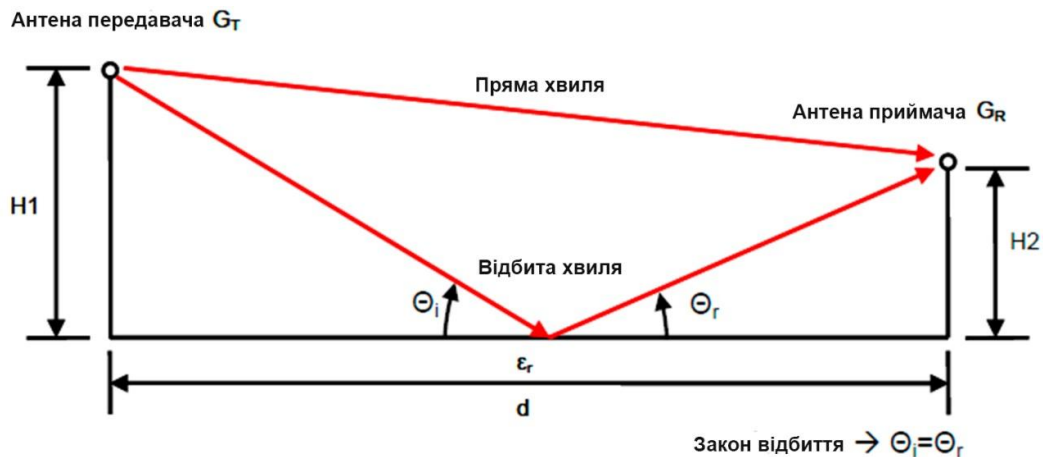


Рис. 1. Відбиття сигналу від землі

Дві хвилі додаються конструктивно або деструктивно в залежності від їх різниці фаз в приймач. Амплітуда і фаза прямих хвиль змінюється залежно від пройденої відстані. Амплітуда відбитої хвилі залежить від загальної пройденої відстані і коефіцієнту відбиття ( $G$ ), що характеризує хвилю до і після відбиття.

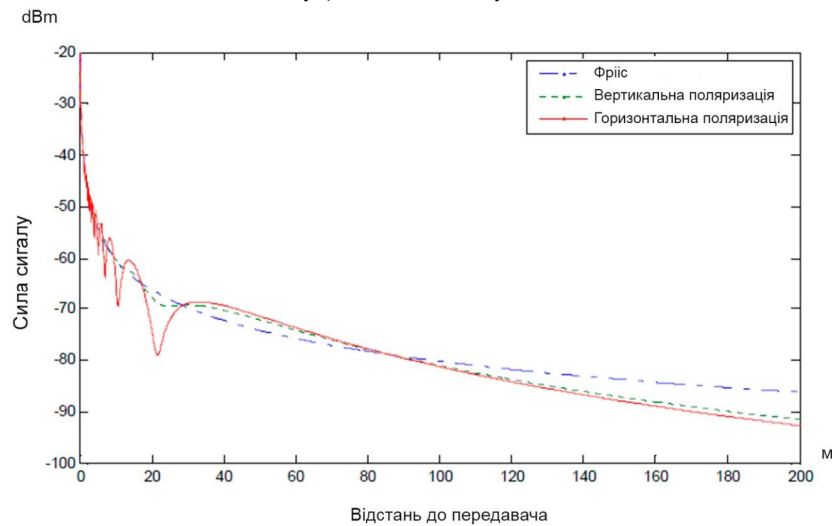
**Коефіцієнт відбиття.** Кожен раз, коли радіосигнал проходить крізь середовища з різною діелектричною проникністю, частина енергії відбивається, а решта енергії передається далі. Частина, що відбилася, залежить від поляризації сигналу, кута падіння і різної діелектричної проникності середовищ ( $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  і  $\sigma$ ). Якщо припустити, що обидві речовини мають рівну проникність  $\mu_r = 1$  і що одне середовище – вільний простір, то рівняння (2) і (3) визначатимуть коефіцієнти відбиття Френеля для вертикальної і горизонтальної поляризації сигналів.

$$G_v = \frac{(\epsilon_r - j60\sigma\lambda)\sin(\theta_i) - \sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda - \cos^2(\theta_i)}}{(\epsilon_r - j60\sigma\lambda)\sin(\theta_i) + \sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda - \cos^2(\theta_i)}}, \quad (2)$$

$$G_h = \frac{\sin(\theta_i) - \sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda - \cos^2(\theta_i)}}{\sin(\theta_i) + \sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda - \cos^2(\theta_i)}}. \quad (3)$$

У рівняння необхідно підставити деякі електричні параметри для ґрунту. З таблиць можна взяти параметри для різних типів середовища. Прийmemo  $\epsilon_r = 18$  і  $\sigma = 0$  і надалі будемо використовувати ці значення для усіх розрахунків.

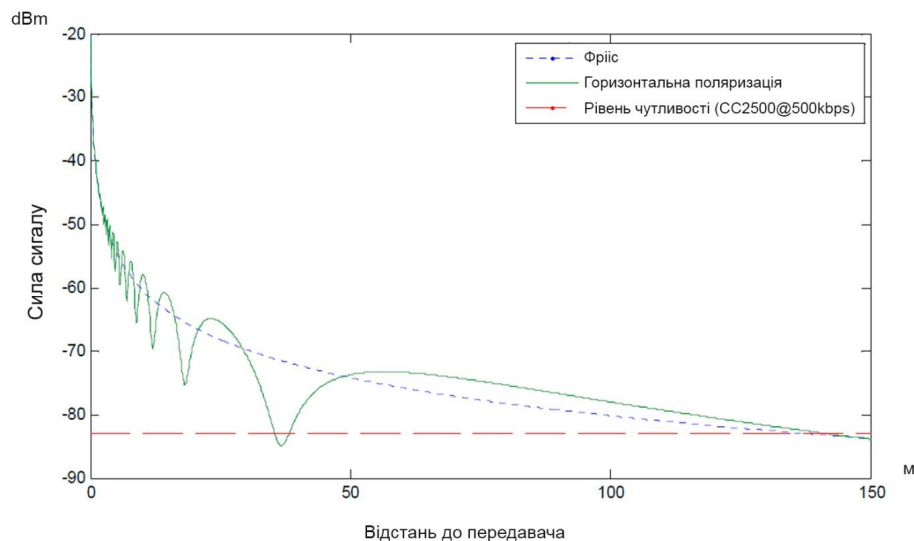
У системах, де  $H1$  і  $H2$  (висоти приймача і передавача над рівнем землі відповідно) є невеликою порівняно з  $D$ , рівняння (2) і (3) може бути спрощено до  $G_v = G_h = -1$ . Тобто в системах з малим кутом падіння хвилі вся енергія відбивається. Зміна фази відбитої хвилі має важливе значення для рівня сигналу, як показано на рисунку 2.



$$H_1 = H_2 = 1.15 \text{ м, } \epsilon_r = 18, f = 2445 \text{ МГц}$$

Рис. 2. Втрати при передачі відповідно до поляризації сигналу

Рисунок 2 показує вплив поляризації і вплив землі у вимірах на відкритому просторі. На графіку можна побачити велику різницю між рівнем сигналу, визначеним рівнянням Фрііс для відкритого простору і рівнем сигналу, якщо врахувати вплив землі. Графік також показує, що горизонтальна поляризація (H) є ефективнішою для багатокрокового поширення сигналу ніж вертикальна (V). На далеких відстанях рівень сигналу із врахуванням впливу землі є значно нижчим, ніж розрахований рівнянням Фрііс. Вертикальна поляризація сигналу дозволяє передавати його з більш високою енергією на великі відстані ніж з використанням горизонтальної поляризації.



$$H_1 = H_2 = 1.15 \text{ м, } \epsilon_r = 18, f = 2445 \text{ МГц}$$

Рис. 3. Багатокрокове згасання

На рисунку 3 показані розрахункові значення для горизонтально поляризованого сигналу частотою 2445 МГц. Для порівняння до графіку також включені величини, розраховані рівнянням Фрііс для вільного простору і рівня чутливості приймача CC2500 рівного 500 кбод. Для вимірювання ефективного радіусу дії для CC2500 на цій швидкості передачі даних, як правило, використовується EВ PER тест з поступовим збільшенням відстані між пристроями радіозв'язку. На рисунку показано, що зв'язок буде втрачено через близько 35 метрів. Очевидно, що діапазон може бути значно більшим. Для того, щоб використати незадіяний діапазон, пристрої повинні бути розміщені на більш ніж 39 м один від одного, щоб відновити зв'язок.

Розташування цієї сліпої плями буде змінюватися в залежності від частот, наземних електричних характеристик і висоти розміщення антени. Дуже важливо знати про це під час вимірювань, щоб визначити чи це є локальна сліпа пляма, чи досягнутий максимальний радіус дії обладнання.

Різниця між рівнем визначеним рівнянням Фрііс і чутливістю приймача часто позначається як запас згасання.

**Шум.** Шум є ще одним важливим параметром при визначенні діапазону. Шум можна класифікувати за його джерелами. Тепловий шум є шум, що створюється всіма об'єктами через їх молекулярну теплову діяльність.

Інше радіовипромінювання можна вважати ще одним джерелом шуму. Шум від іншого електричного обладнання досить важко описати математичними/статистичними моделями. Рівняння (4) описує тепловий шум.

$$v_n = \sqrt{\frac{4hfBR}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}} \approx \sqrt{4kTBR} \text{ [Volt}_{rms}\text{]}. \quad (4)$$

Температура, ефективна ширина смуги шуму і опір визначають загальний тепловий шум.

При кімнатній температурі (300 К, 27°C) це рівняння часто апроксимується до  $-174 \text{ дБм} + 10\log_{10}(B)$ , описуючи ситуацію з досконалим навантаженням.

Тепловий шум не є проблемою під час вимірювань. Слід, однак, перевірити, що територія вільна від інших джерел шуму на тій же смузі частот. Це може бути зроблено за допомогою спектр-аналізатора для пошуку джерел шуму до виконання тесту. Цю перевірку слід регулярно повторювати з однаковими інтервалами під час тесту. Рекомендовано вибирати ділянки з низькою ймовірністю виникнення сторонніх шумів.

#### Експериментальні дослідження.

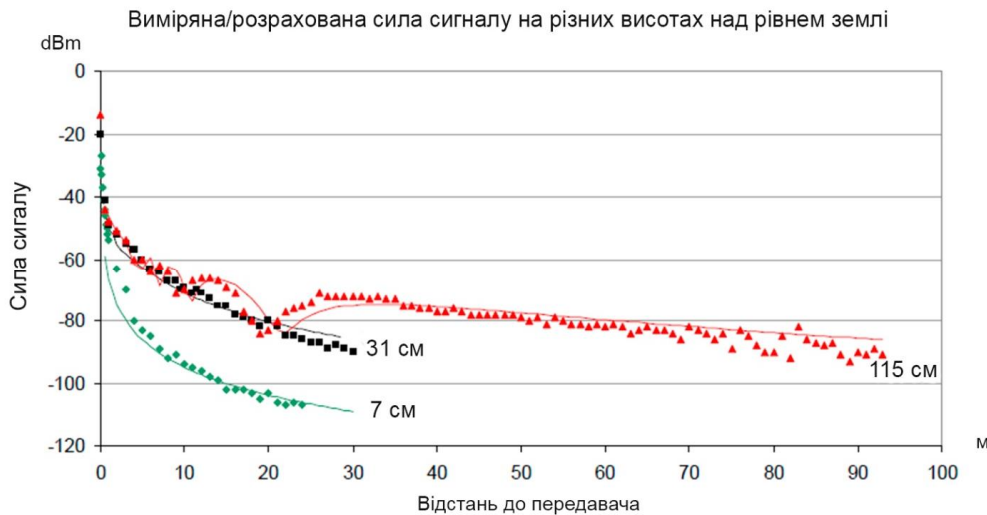


Рис. 4. Рівні сигналу на різних висотах 7см, 31см та 115см над землею

На рисунку 4 показано порівняння між CC2500, що працює в SmartRF04EB і моделлю відображення сигналу від землі у Matlab. Вимірювання були виконані на футбольному полі. Точки – це вимірювання рівня сигналу, а лінії – розрахункові значення.

Фіксований рівень корекції був доданий до розрахункових значень, щоб отримати краще узгодження з виміряними значеннями. Це значення корекції являє собою різницю між ідеальною ізотропною антеною та ефективністю CC2500EM і SmartRF Studio EB.

Виміряна енергія сигналу була вищою для горизонтально поляризованого сигналу. Це пояснюється використанням горизонтально-орієнтованої чвертьхвильової антени.

#### Висновки

Було розглянуто вплив землі під час вимірювань дальності дії радіопередавача CC2500.

Було показано, що багатокрокове затухання може створювати плутанину під час вимірювань, якщо не враховувати згадане явище. Було виявлено, що земля значно пришвидшує затухання сигналу в порівнянні з розрахованим за рівнянням Фрііс. Отже, земля знижує ефективну дальність.

Було показано, що вертикальна поляризація менш схильна до затухання від відображення від землі і, як наслідок, зменшення діапазону, ніж горизонтальна поляризація. Для просто обладнання поляризація, як правило, не є контрольованим параметром і це не відіграє значної ролі.

Нарешті, було підкреслено, що інші радіовипромінювання в діапазоні вимірювань повинні контролюватися протягом вимірювань.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Дымов, А.В. Исследование распространения радиоволн в городских условиях в диапазоне 1800 МГц / А.В. Дымов, В.А. Тимофеев // Труды XIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь». – Воронеж, 2007. – Т.1. – С.611-616.
2. Г.А. Ерохин, О.В. Чернышев, Н.Д. Козырев, В.Г. Кочержевский. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. Под. ред. Г.А. Ерохина. – 2-е изд. – М.: Горячая линия - Телеком, 2004. – 491 с.
3. Журнал «Беспроводные технологии» №1. – 2007 г.
4. Козлов, Р.Ю. Моделирование распространения радиоволн в городе с учетом рельефа местности / Р.Ю. Козлов, В.А. Тимофеев // Труды X международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2004. – Т. 3. – С.1845 – 1850.
5. Модели радиоканала. Имитационное моделирование компьютерных сетей. [http://student.telum.ru/images/2/28/Network\\_modeling\\_lecture\\_03.pdf](http://student.telum.ru/images/2/28/Network_modeling_lecture_03.pdf)
6. Семенов А.И. Распространение радиоволн по естественным трассам. Учебное пособие для вузов. – М., САЙНС-Пресс, – 2005.
7. Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой. - М.: Радио и связь, – 2005. – 648 с
8. Яковлев, О.И. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павелъев. – СПб. Ленанд, – 2009. – 496 с.
9. Radar Technology Encyclopedia, David K. Barton, Sergey A. Leonov, 1997 Artech House Inc. Boston/London
10. [http://en.wikiversity.org/wiki/Friis\\_Transmission\\_Equation](http://en.wikiversity.org/wiki/Friis_Transmission_Equation)