

Оценивание границ трехмерных доминантных областей многолучевости радиолиний в беспроводных сенсорных сетях

Ю.В. Самойлов, инженер 1 категории филиала ФГУП НИИР-СОНИИР, аспирант Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева; samoilov.yv@soniir.ru

Д.В. Лучин, директор филиала ФГУП НИИР-СОНИИР, к.т.н.; dmyl@soniir.ru

УДК 621.3.09

Аннотация. Проведена оценка границ трехмерных доминантных областей многолучевости радиолиний. Введено понятие доминантной области многолучевости. Разработана методика, позволяющая оценить радиус круговой площадки, в границах которой учитывается влияние рассеивателей при заданном отношении энергии, обусловленной многолучевостью рассеянных каналов, к энергии прямого канала с учетом влажности грунта. Произведен расчет радиуса доминантной области многолучевости на рабочих частотах в беспроводных сенсорных сетях.

Ключевые слова: многолучевость, беспроводные сенсорные сети, приземное распространение радиоволн.

ВВЕДЕНИЕ

Область применения беспроводной передачи данных расширяется с каждым годом. Многообразие возможных вариантов использования этого вида связи определяют разные варианты условий распространения радиоволн. Ярким примером таких систем, реализуемых на различных радиолиниях, являясь беспроводные сенсорные сети (БСС). Широкий круг задач, решаемых с помощью БСС, обуславливает многообразие условий распространения радиоволн. Надлежащий учет этого фактора в значительной степени определяет все качественные показатели БСС.

Надежным способом получения информации о работоспособности системы связи в конкретных условиях (на основе конкретной радиолинии) является экспериментальное исследование трассы распространения радиоволн. Однако такой подход, будучи весьма затратным, зачастую нереализуем на практике, что актуализирует проблему математического моделирования трассы. При правильно выбранной модели сбор и обработка необходимых параметров занимает гораздо меньше времени и обеспечивает необходимую точность [1].

Проблемы теоретического анализа и моделирования условий распространения радиоволн, расчета параметров трасс радиолиний и т.п. изучаются достаточно давно. Опубликовано немало работ, приводить которые здесь не имеет смысла, так как итоговым обобщением всех этих исследований стали рекомендованные Международным союзом электросвязи (МСЭ) расчетные методики [2, 3]. Существенным при этом является то, что имеющиеся на сегодня результаты относятся в основном к двум типам радиолиний:

- с устойчивым каналом прямой видимости, энергетика которого значительно превышает энергетiku парциальных каналов, обусловлен-

ных многолучевостью — переотражением волн от подстилающей поверхности и посторонних предметов (рассеивателей);

- с значительно подавленным каналом прямой видимости, энергетика которого обусловлена парциальными каналами.

Радиолинии первого типа используются, например, в системах сухопутной радиосвязи и вещания в диапазонах ОВЧ и УВЧ [4]. Антенны в таких системах подняты на большую высоту, связь происходит в пределах прямой видимости. Эллипсоид области, существенной для распространения радиоволн, не касается или почти не касается земной поверхности, т.е. энергетика канала прямой видимости практически такая же, как в свободном пространстве [5–7]. При этих условиях поля парциальных волн, вызванных рассеянием на подстилающей поверхности и посторонних предметах, представляют собой малую аддитивную добавку к полному полю в точке приема. Замирания сигнала выражены слабо, и уровень сигнала как случайная величина имеет распределение, близкое к нормальному с относительно малой дисперсией.

Расчет параметров таких радиолиний сводится в основном к оцениванию энергетика канала прямой видимости с учетом (при необходимости) влияния затеняющих препятствий (перекрывающих в той или иной степени эллипсоид существенной для распространения области) и факторов многолучевости, например, городской застройки [2, 6–8].

Типичный пример радиолиний второго типа — радиолинии в системах диапазона ВЧ, использующих ионосферные волны (канал прямой видимости отсутствует). Можно привести и другие примеры, скажем те же БСС, либо иные радиосистемы в случаях, когда сигнал в кана-

ле прямой видимости заметно слабее сигналов парциальных волн, вызванных рассеянием. В таких условиях в точке приема возникает сложная интерференционная картина со значительной вариацией поля, причем не только в пространстве, но и во времени — при перемещении пункта радиосвязи, нестабильности условий распространения и т.д.

В результате возникают сильные замирания, проявляющиеся не только как наблюдаемые в реальном масштабе времени колебания уровня сигнала, но и в виде изменений его в широких пределах на множестве положений пунктов радиосвязи, скажем в БСС (случайный характер здесь обусловлен, например, случайным выбором точки размещения пункта) [9]. Данный факт подтверждается анализом большого числа записей уровней сигналов, полученных многими исследователями, и показывает, что в подобных условиях огибающая принимаемого радиосигнала распределена по закону Рэлея [10–13]. Расчет параметров радиолиний такого типа сводится к оцениванию энергетики парциальных каналов, обусловленных рассеянием [3, 6, 7, 10–12].

Оба типа радиолиний относятся к двум крайним случаям — канал прямой видимости либо доминирует энергетически, либо практически не оказывает влияния. Это упрощает расчеты. Для радиолиний первого типа требуется оценить только энергетику канала прямой видимости, проблема замираний не столь актуальна. Расчет для второго типа несколько сложнее: для восстановления распределения Рэлея достаточно определить всего один параметр — тот или иной момент распределения, медиану и т.д.

На практике часто приходится иметь дело с промежуточным случаем, когда канал прямой видимости подавлен лишь частично, и его энергетика соизмерима с энергетикой парциальных каналов, обусловленных рассеянием. Подобные ситуации могут возникать в различных радиосистемах, но наиболее типичны они именно для БСС в силу известной их специфики [9]. При частично подавленном канале прямой видимости случайная величина уровня сигнала распределена уже по закону Райса [13, 14], что усложняет расчеты, поскольку для восстановления распределения Райса требуется знать уже два параметра. Это могут быть, например, среднеквадратическое математическое ожидание и дисперсия порождающих нормальных законов, определяемые энергетикой соответственно канала прямой видимости и парциальных каналов, обусловленных рассеянием; может быть взята другая пара параметров, однозначно связанная с указанными [14]. Все это требует повышенной точности оценки совокупной энергетики радиолинии и относительного вклада в нее каналов, связанных с различными механизмами распространения.

Вопросы, касающиеся радиолиний с частично подавленными каналами прямой видимости, к настоящему времени изучены недостаточно. Статья посвящена рас-

смотрению частного, но достаточно важного вопроса, возникающего в рамках данной проблематики — ограничения области пространства, в пределах которой должны учитываться явления рассеяния (переотражения) радиоволн, порождающие парциальные каналы.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГРАНИЦ ТРЕХМЕРНОЙ ДОМИНАНТНОЙ ОБЛАСТИ МНОГОЛУЧЕВОСТИ

Понятно, что начиная с некоторого удаления (зависящего от высоты над земной поверхностью), влиянием переотраженных парциальных волн можно пренебречь. Другими словами, должна существовать такая поверхность, охватывающая радиолинию, чтобы необходимо было учитывать рассеиватели, находящиеся внутри ограниченной этой поверхностью области, а влиянием рассеивателей, расположенных за пределами указанной области, можно было пренебречь. Данную область будем называть *доминантной областью многолучевости* по аналогии с вводимым в классической теории распространения радиоволн понятием доминантной области радиолинии.

Принимая во внимание тот факт, что основным фактором многолучевости (присутствует всегда) является земная поверхность с неровностями, которые при достаточно высоких частотах нарушают известный критерий Рэлея [5], рассмотрим вопрос определения границ доминантной области на ее уровне.

Плотность переизлученной земной поверхностью мощности p^s , Вт/м², (мощность, переизлученная элементом поверхности ds) определяется аналогично тому, как это делается применительно к протяженным рассеивателям:

$$p^s = |\vec{\Gamma}^0| \hat{S}^{[\text{эфф}]} ds, \quad (1)$$

где $\vec{\Gamma}^0$ — вектор Пойнтинга падающей волны, Вт/м²; $\hat{S}^{[\text{эфф}]}$ — эффективная поверхность рассеяния (ЭПР), м².

Сделаем допущение. Будем полагать, что сложение переизлученных парциальных волн в точке наблюдения происходит квадратично, т.е. по мощности. Основанием для такого предположения служит то обстоятельство, что число парциальных волн весьма велико и при подобных условиях поле в точке приема (напряжение на входе приемника) как функция времени при случайном перемещении точки приема будет представлять собой шумоподобный процесс.

В рамках оценивания переизлученных парциальных волн применим упрощенную методику Шулейкина—Ван-дер-Поля, использующую упрощенную аппроксимацию функции Берроуза [5]. Плотность потока энергии (ППЭ) переизлученной волны

$$|\vec{\Gamma}^s| = 120 P^s F^2(r)/r^2, \quad \text{Вт/м}^2, \quad (2)$$

где P^s — переизлученная мощность, Вт; $F(r)$ — функция ослабления Берроуза.

Аппроксимируем функции Берроуза в логарифмиче-

ском масштабе кусочно-линейной функцией вида

$$\lg F \approx \begin{cases} -\lg(q\beta r), & q\beta r \geq 1; \\ 0, & q\beta r < 1. \end{cases}$$

Отсюда получаем приближенную формулу для функции Берроуза:

$$F \approx \begin{cases} \frac{1}{q\beta r}, & q\beta r \geq 1; \\ 1, & q\beta r < 1. \end{cases} \quad (3)$$

где β – волновое число; $q = \frac{|\tilde{\epsilon} - 1|}{|\tilde{\epsilon}|^2}$ – параметр для вертикальной поляризации; $q = \frac{1}{|\tilde{\epsilon} - 1|}$ – для горизонтальной;

$\tilde{\epsilon} = \epsilon_a / \epsilon_0 - i\sigma / (\omega\epsilon_0)$ – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость [5].

Оценим параметр q в диапазоне 0,8...2,4 ГГц:

- влажная земля – $q \approx 0,05...0,15$;
- сухая земля – $q \approx 0,15...0,5$.

Таким образом,

$$|\tilde{\Gamma}^s| \approx \frac{120P^s}{(q\beta)^2 r^4} \approx (480...48000) \frac{P^s}{\beta^2 r^4}. \quad (4)$$

Суммарная ППЭ от кольца радиусом ρ_0 и шириной $d\rho$ в предположении равномерности возбуждения кольца падающей волной определится соотношением:

$$|\tilde{\Gamma}^s| \approx \frac{120P^s}{(q\beta)^2 \rho_0^4} 2\pi\rho d\rho = \frac{240\pi P^s}{(q\beta)^2 \rho_0^3} d\rho. \quad (5)$$

Суммарная ППЭ от всей части поверхности за пределами указанного кольца (в предположении равномерности возбуждения этой части поверхности падающей волной) составит

$$|\tilde{\Gamma}^s|_{\Sigma} \approx \frac{240\pi P^s}{(q\beta)^2} \int_{\rho_0}^{\infty} \frac{1}{\rho^3} d\rho = \frac{120\pi P^s}{(q\beta)^2 \rho_0^2} = \frac{120\pi \hat{S}^{[\text{эфф}]}}{(q\beta\rho_0)^2} |\tilde{\Gamma}^0|. \quad (6)$$

При этом $|\tilde{\Gamma}^0|$ – ППЭ падающего поля (прямой канал). Следовательно, относительная энергия обуславливающих многолучевость рассеянных каналов (за пределами кольца радиусом ρ_0) по отношению к прямому каналу определится как функция от ρ_0 :

$$Q(\rho_0) = |\tilde{\Gamma}^s| / |\tilde{\Gamma}^0| = \frac{120\pi \hat{S}^{[\text{эфф}]}}{(q\beta\rho_0)^2}. \quad (7)$$

Задавшись некоторым достаточно малым значением Q из (7) можно определить параметр ρ_0 – радиус круговой площадки, представляющей доминантную область многолучевости на поверхности земли.

В качестве примера потребуем выполнения двух условий:

$$q\beta\rho_0 \geq 1; Q(\rho_0) \leq 0,01, \quad (8)$$

т.е. энергетика отбрасываемых рассеянных каналов не должна превышать 1% от энергетика канала прямой

видимости. Из 2-го условия (8) имеем:

$$\rho_0 \geq 10 \frac{\sqrt{120\pi \hat{S}^{[\text{эфф}]}}}{q\beta} \approx 194 \frac{\sqrt{\hat{S}^{[\text{эфф}]}}}{q\beta}.$$

С учетом этого 1-е условие (8) можно переписать следующим образом: $194\sqrt{\hat{S}^{[\text{эфф}]}} \geq 1$, или $\hat{S}^{[\text{эфф}]} \geq 1/194^2 \approx 2,6 \cdot 10^{-5}$. Очевидно, что последнее условие всегда выполняется.

ОЦЕНКА РАДИУСА ДОМИНАНТНОЙ ОБЛАСТИ МНОГОЛУЧЕВОСТИ НА РАБОЧИХ ЧАСТОТАХ БСС

Оценим значения радиуса доминантной области многолучевости для конкретных условий:

- 2,4 ГГц, сухой грунт, $q = 0,15...0,5$:
 $\rho_0 \geq (7,7...25,7)\sqrt{\hat{S}^{[\text{эфф}]}}$;
- 2,4 ГГц, влажный грунт, $q = 0,05...0,15$:
 $\rho_0 \geq (25,7...77,1)\sqrt{\hat{S}^{[\text{эфф}]}}$;
- 0,8 ГГц, сухой грунт, $q = 0,15...0,5$:
 $\rho_0 \geq (23,1...77,1)\sqrt{\hat{S}^{[\text{эфф}]}}$;
- 0,8 ГГц, влажный грунт, $q = 0,05...0,15$:
 $\rho_0 \geq (77,1...231)\sqrt{\hat{S}^{[\text{эфф}]}}$.

Пусть квадрат $\lambda \times \lambda$ переизлучает как пассивный полуволновый вибратор (дипольный отражатель), т.е. плотность таких отражателей равна $1/\lambda^2$. ЭПР пассивного полуволнового вибратора составляет $0,17\lambda^2$ и, следовательно, $\hat{S}^{[\text{эфф}]} = 0,17$. При этом имеют место следующие оценки ρ_0 :

- 2,4 ГГц, сухой грунт, $q = 0,15...0,5$:
 $\rho_0 \geq 3,2...10,6$ м;
- 2,4 ГГц, влажный грунт, $q = 0,05...0,15$:
 $\rho_0 \geq 10,6...31,8$ м;
- 0,8 ГГц, сухой грунт, $q = 0,15...0,5$: $\rho_0 \geq 9,5...31,8$ м;
- 0,8 ГГц, влажный грунт, $q = 0,05...0,15$:
 $\rho_0 \geq 31,8...95,2$ м.

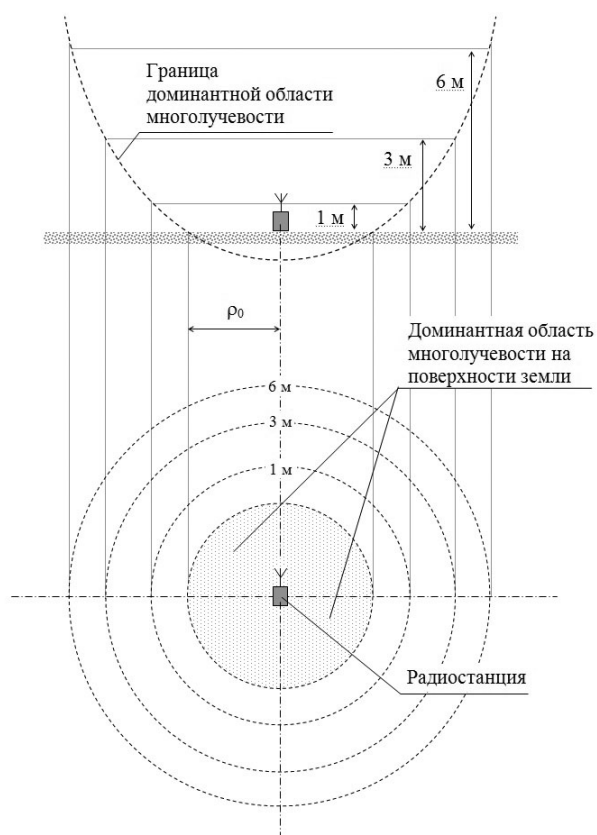
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ДОМИНАНТНОЙ ОБЛАСТИ МНОГОЛУЧЕВОСТИ ДЛЯ ПУНКТА РАДИОСВЯЗИ

С увеличением высоты затухание парциальных волн уменьшается, что должно компенсироваться соответствующим возрастанием радиуса доминантной области. С увеличением высоты затухание по ППЭ и мощности уменьшается примерно квадратично, с возрастанием радиуса доминантной области затухание, напротив, увеличивается примерно как 4-я степень его величины. Следовательно, зависимость высоты от радиуса области должно иметь вид, близкий к параболе.

Конкретный вид данной зависимости определяется путем расчета ослабления по отдельной методике. Применяемая методика на момент написания статьи реализована в виде специализированного программного обеспечения. Ее подробное описание станет предметом следующей статьи.

На рисунке схематично проиллюстрирован процесс построения доминантной области многолучевости для одного пункта радиосвязи. Из принципа взаимности следует, что такая же область должна быть построена и

Построение доминантной области многолучевости для пункта



для другого пункта радиосвязи. В результате возникают две парциальные доминантные области. Однако нельзя исключать из рассмотрения и область, расположенную между ними (промежуточная доминантная область многолучевости), хотя бы потому, что в ней могут быть затеняющие препятствия.

Сделанное выше предположение о равномерности возбуждения кольцевых областей, окружающих пункт радиосвязи, справедливо при $r_g \gg \rho_0$ (r_g — «горизон-

тальное расстояние» между пунктами радиосвязи). При сближении пунктов эти условия нарушаются, парциальные доминантные области пунктов деформируются, как и область между ними.

Расчеты показывают, что деформацией парциальных доминантных областей пунктов радиосвязи при их сближении можно пренебречь. Что же касается промежуточной доминантной области, то, как показали расчеты, ее границы на поверхности образуют выпуклую фигуру примерно эллиптической формы (эллипс, описывающий круговые парциальные области на поверхности земли с радиусом ρ_0). Ширину промежуточной области в среднем сечении радиолинии d можно оценить как

- $d \approx 4\rho_0$ при $r_g \gg \rho_0$;
- $d \approx 2\rho_0$ при $r_g \approx \rho_0$ и $r_g \ll \rho_0$.

Благодаря полученным соотношениям между радиусом доминантной области многолучевости и расстоянием между пунктами радиосвязи появилась возможность строить доминантные области для радиолинии в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика оценивания доминантной области многолучевости (в границах которой учитываются местные предметы — переизлучатели радиосигнала) имеет более широкие возможности по сравнению с известными методиками решения аналогичных или близких задач, прежде всего, в части учета вертикальной вариации формы границы области. Работоспособность и эффективность методики вполне подтверждаются проведенными исследованиями.

Ожидается, что в наибольшей степени эффективность методики будет проявляться при исследовании радиолиний, занимающих промежуточное положение между радиолиниями с превалирующим каналом прямой видимости (распределение сигнала на приеме близко к нормальному с относительно малой дисперсией), и радиолиниями с почти полностью подавленным каналом прямой видимости (релеевское распределение сигнала на приеме).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Самойлов Ю.В., Лучин Д.В.** Результаты экспериментальной верификации компьютерной модели УВЧ радиоканала с частотно-временным рассеянием / Материалы XV международ. науч.-техн. конф. «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (ПТиТТ-2014). — Казань, 2014. — С. 142–144.
2. Рекомендация МСЭ-R P.1546-4. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц, 2009.
3. Рекомендация МСЭ-R P.533-10. Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий, 2009.
4. **Лучин Д.В., Юдин В.В.** Конвергенция антенной и программно-аппаратный компонент как тенденция развития радиосистем диапазонов ВЧ, ОВЧ и УВЧ // Труды НИИР. — 2014. — № 3. — С. 73–84.
5. **Никольский В.В., Никольская Т.И.** Электродинамика и распространение радиоволн. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1989. — 544 с.
6. **Долуханов М.П.** Распространение радиоволн. — М.: Связь, 1972. — С. 336.
7. **Калинин А.И., Черенкова Е.Л.** Распространение радиоволн и работа радиолиний. — М.: Связь, 1971. — С. 440.
8. **Okumura Y.** et al. Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service // Rev. Elect. Comm. Lab. — 16 September 1968. — P. 825–873.
9. **Лучин Д.В., Самойлов Ю.В.** Возможность использования стандарта 802.15.4g в каналах с ярко выраженным частотно-временным рассеянием / Сб. тр. XXI междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж. — 2015. — Т. 3. — С. 1095–1103.
10. **Nylund H.W.** Characteristics of Small-Area Signal Fading on Mobile Circuits in the

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

150 MHz Band // IEEE Trans. Veh. Tech. VT-17. – October 1968. – P. 24–30.

11. Trifonov P.M., Budko V.N.,

Zotov V.S. Structure of USW Field Strength Spatial Fluctuations in a City // Trans. Telecomm. Radio Eng. – February 1964. – № 9. – P. 26–30.

12. Young W.R. Jr. Comparison of Mobile Radio Transmission at 150, 450, 900, and 3700 MHz // Bell System Tech. – November 1952. – Vol. 31. – P. 1068–1085.

13. Самойлов Ю.В., Лучин Д.В. Исследование характеристик помехоустойчивости СКК в системах радиосвязи с приземным

расположением антенн // Т-COMM: Телекоммуникации и Транспорт. – 2015. – Т.9, № 11. – С. 7–11.

14. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.

Получено 09.02.18