

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СЕТИ LTE**Постановка задачи**

Беспроводные сети передачи информации являются одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. LTE – это технология широкополосной беспроводной связи, дополняющая линии DSL и кабельные технологии в качестве альтернативного решения проблемы "последней мили" на больших расстояниях [1]. При проектировании сети исследователям и разработчикам необходимо оценивать электромагнитную совместимость (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) сети.

Отдельные элементы сетей и систем, использующие радиолинии, создают помехи для других элементов сети, в свою очередь они являются объектами помеховых воздействий. Разработано много методов, методик, теоретических обоснований, посвященных улучшению электромагнитной обстановки (ЭМО) в радиолиниях, проблеме обеспечения ЭМС [2]. Можно считать, что в стационарных условиях, особенно при дуэльном рассмотрении (передатчик – приемник) задачи ЭМС практически разрешимы. Ситуацию и саму ЭМО сильно усложняет тот факт, что в эту обстановку вносятся различные часто случайные факторы с трудно прогнозируемым характером. В этих условиях заранее рассчитать ЭМО и решить задачу ЭМС с достаточной точностью не всегда удается, а часто просто невозможно из-за априорной неопределенности.

Учитывая наличие помех с определенным уровнем мощности, замирание сигналов, изменение трафика, местоположения абонентов, тепловые шумы в каналах связи и т.д., можно утверждать, что электромагнитные взаимодействия в группировках РЭС сети LTE имеют динамический, стохастический характер. Эта отличительная особенность сети LTE накладывает определенные ограничения на синтез моделей электромагнитных взаимодействий в группировках РЭС и условия как внутрисистемной их ЭМС, так и межсистемной. Таким образом, разработка модели электромагнитных взаимодействий в группировках РЭС сети LTE является актуальной научной задачей.

Модель размещения и перемещения радиоэлектронных средств сети

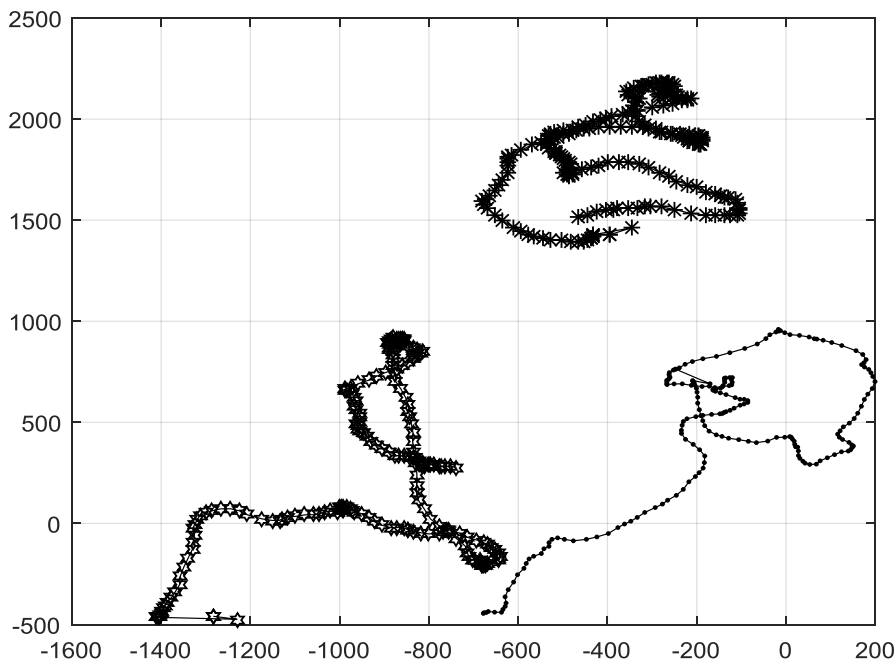
Архитектура сети LTE разработана таким образом, чтобы обеспечить поддержку пакетного трафика с так называемой “гладкой” (“бесшовной”, seamless) мобильностью, минимальными задержками доставки пакетов и высокими показателями качества обслуживания. Мобильность как функция сети обеспечивается двумя ее видами: дискретной мобильностью (роумингом) и непрерывной мобильностью (хэндовером). Поскольку сети LTE должны поддерживать процедуры роуминга и хэндовера со всеми существующими сетями абонентских терминалов (АТ), должно обеспечиваться повсеместное покрытие услуг беспроводного широкополосного доступа.

В качестве модели размещения и перемещения АТ предложено использовать формирующий фильтр:

$$\begin{cases} \frac{d \vec{x}(t)}{dt} = F_x \vec{x}(t) + G_x \vec{\xi}_x(t); \\ \frac{d \vec{y}(t)}{dt} = F_y \vec{y}(t) + G_y \vec{\xi}_y(t); \\ \frac{d \vec{z}(t)}{dt} = F_z \vec{z}(t) + G_z \vec{\xi}_z(t); \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{x}(t), \vec{y}(t), \vec{z}(t)$ – координаты размещения и перемещения АТ; F_x, F_y, F_z – матрицы состояния координат; G_x, G_y, G_z – матрицы генерации координат; $\vec{\xi}_x(t), \vec{\xi}_y(t), \vec{\xi}_z(t)$ – векторные белые гауссовы шумы для формирования движения. Система уравнений (1) позволяет моделировать движение АТ в пространстве.

На рисунке представлена реализация движения трех АТ на плоскости:



Распространение сигналов в линиях связи

Как и во всех других линиях связи и радиоэлектронных системах, в линиях сети LTE распространяющиеся радиоволны имеют сложную случайно-детерминированную структуру и подчиняются законам электродинамики, а их параметры описываются уравнениями Максвелла [3, 4]. Можно выделить три основных механизма, определяющие параметры сигналов на входе приемных антенн:

1) Главная часть мощности принимаемого сигнала определяется уравнением передачи:

$$P_{np} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} - W_{cv} - \eta_{np} - \eta_{nep}, \quad (2)$$

где P_{nep} – мощность передатчика; G_{nep}, G_{np} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно; $W_{ce} = (\lambda/4\pi R(t))^2$ – ослабление в свободном пространстве на длине волны λ и на расстоянии $R(t)$, которое изменяется во времени; η_{np}, η_{nep} – коэффициенты полезного действия приемного и передающего фидеров.

2) Дополнительное затухание, вызванное влиянием стен, перекрытий этажей и др.:

$$W_{don}^{(1)} = W_0 \cdot K^{\left(\frac{K+2}{K+1} - c\right)} \text{ [дБ]}, \quad (3)$$

где W_0 – ослабление за счет влияния стены или межэтажного перекрытия. Обычно [5, 6] для стены берется $W_{0c} = 8,38$ дБ и $c = 0,51$, межэтажного перекрытия $W_{0p} = 18,3$ дБ и $c = 0,46$, K – количество перегородок или межэтажных перекрытий.

Если условия распространения таковы, что в окружающей среде достаточно много различных переизлучающих или поглощающих энергию объектов, то вводится еще один дополнительный множитель ослабления [3, 5]:

$$W_{don}^{(2)} = \delta \cdot R(t), \quad (4)$$

где δ – погонный коэффициент, учитывающий заполнение пространства различными предметами. Для почти пустого пространства $\delta = 0,2$ дБ/м, для переполненного пространства $\delta = 0,6$ дБ/м.

3) Случайная компонента дополнительного затухания

$$W_{cl}(t) = W_{cl}^{(M)}(t) + W_{cl}^{(\delta)}(t), \quad (5)$$

где $W_{cl}^{(M)}(t), W_{cl}^{(\delta)}(t)$ – медленные и быстрые случайные замирания соответственно.

Быстрые замирания характерны для достаточно протяженных, при $R > 30 - 50$ км, преимущественно закрытых или полужакрытых радиотрасс. Для офисных, учреждений радиотрасс или радиотрасс в пределах микрорайона принято считать $W_{cl}^{(\delta)}(t) \rightarrow 0$. Для закрытых или полужакрытых радиотрасс при $R > 30 - 50$ км величина быстрых замираний зависит от скорости абонента и составляет порядка 20 – 30 дБ.

Причиной, порождающей случайно изменяющиеся уровни сигналов, являются различные перемещения людей и предметов, элементов мебели, перемещения транспортных единиц и др., отраженный сигнал от которых приходит в точку приема со случайной фазой и (или) со случайной фазой и амплитудой. Квазипериод этих замираний составляет секунды и более длительные временные отрезки. Медленные замирания со значительно большими квазипериодами (часы) могут быть результатом воздействия атмосферных факторов. Медленные замирания подчиняются случайному логарифмически-нормальному закону, когда логарифм от уровня сигнала $u_c(t)$ распределен нормально с параметрами $N(0, \sigma)$. Тогда [5, 6]

$$W_{cl}^{(M)}\{u(t)\} = \rho W_{cl}^{(M)}\{u(t - \Delta t)\} + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot N(0, \sigma), \text{ [дБ]} \quad (6)$$

где ρ – коэффициент корреляции между двумя сечениями случайного процесса изменения $W_{cl}^{(M)}\{u(t)\}$, разнесенных на интервал Δt . Как правило, в крупных городах интенсивность медленных замираний составляет порядка 10 дБ, в пригородах – до 6 дБ.

Общее дополнительное к (1) ослабление

$$W_{общ} = W_{cl} + W_{don}^{(1)} + W_{don}^{(2)} + W_{cl}^{(\delta)}(t) + W_{cl}^{(M)}(t). \quad (7)$$

В результате детального рассмотрения условий распространения радиоволн получаем уравнение (2) в развернутом виде:

$$P_{np} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} - W_{общ} - \eta_{np} - \eta_{nep}. \quad (8)$$

Уравнение передачи (8) используется для моделирования энергетики линий сети LTE.

Используя метод Монте-Карло для моделирования случайного размещения АТ, будем считать, что каждым АТ излучается электромагнитная энергия для приема сигналов базовой станцией (БС). Эта же энергия является мешающим сигналом для другого АТ. БС принимает сигналы от АТ в соответствии с (8) и передает их по назначению. АТ получают сигнал от БС также в соответствии с выражением (8). Поэтому, моделируя электромагнитную обстановку в исследуемой зоне, можно принять в качестве помех суммарную мощность сигналов от АТ:

$$P_{ni} = \sum_{j=1}^k P_{ATj}, \quad i \neq j, \quad (9)$$

где P_{ATj} находится в соответствии с выражением (8) в зависимости от расположения i -го и j -го АТ, k – количество мешающих АТ.

Расстояния между i -м и j -м АТ находим из выражения

$$R_{ij}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2 + (z_i(t) - z_j(t))^2}, \quad (10)$$

где $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$ – координаты i -го АТ, $x_j(t)$, $y_j(t)$, $z_j(t)$ – координаты j -го АТ, определяемые моделью (1).

Используемые в сети LTE широкополосные сигналы излучаются в общей полосе частот. Параметры излучаемых сигналов выбраны таким образом, что в отсутствие внешних помех передача информации с заданной скоростью осуществляется с требуемой достоверностью и надежностью. Однако при появлении дополнительных шумовых, импульсных или иных окранных помех внутрисистемные помехи необходимо учитывать. Оценим уровень этих помех.

Известно [7 – 11], что для M одновременно работающих широкополосных передатчиков спектральная плотность мощности взаимных помех определяется выражением

$$P_n = \frac{r(M-1)P_c}{\Delta F}, \quad (11)$$

где P_c – уровень мощности полезного сигнала одной станции; ΔF – полоса частот, выделенная для работы сети LTE; r – коэффициент, характеризующий взаимно корреляционные свойства широкополосных сигналов.

Отношение уровней сигнал/шум на входе приемника

$$h^2 = \frac{P_c T}{P_n^{(\Sigma)}}, \quad (12)$$

где $P_n^{(\Sigma)} = P_u + P_n$ – сумма мощностей шумовой гауссовой помехи со спектральной плотностью мощности N_0 и помех (11), действующих в пределах основной полосы ΔF ; T – длительность одного элемента широкополосного сигнала.

Подставляя (11) в (12), получаем

$$h^2 = \frac{P_c T}{P_n^{(\Sigma)}} = \frac{P_c T}{P_u} \frac{T}{T} \frac{P_u}{(P_u + \frac{r(M-1)P_c}{\Delta F})} = \frac{h_0^2}{1 + r(M-1)h_0^2}, \quad (13)$$

где $h_0^2 = P_c/P_{ш}$ – отношение уровней полезных сигналов к уровню собственного гауссового шума в полосе частот ΔF , $B = \Delta F \cdot T$ – база широкополосного сигнала.

Заключение

Беспроводные сети передачи информации являются одним из основных направлений развития инфокоммуникаций. LTE – стандарт универсальных городских сетей, в которых беспроводной широкополосный доступ используется широким спектром приложений – от традиционной передачи речи до современных мультимедиа-приложений. Технология LTE использует соответствующие протоколы взаимодействия узлов сети для управления передачей пакетов по общему каналу связи. Наличие общего канала связи, коллективно используемого абонентами (зачастую очень большим их числом), является общей чертой современных и перспективных беспроводных телекоммуникационных систем.

Учитывая такие факты как помехи с определенным уровнем мощности, замирания сигналов, изменение трафика, местоположения абонентов, тепловые шумы в каналах связи и т.д., можно утверждать, что электромагнитные взаимодействия в группировках РЭС сети LTE имеют динамический, стохастический характер. Эта отличительная особенность сети LTE накладывает определенные ограничения на синтез моделей электромагнитных взаимодействий в группировках РЭС и условия как внутрисистемной их ЭМС, так и межсистемной.

Разработана математическая модель электромагнитных взаимодействий в группировках РЭС сети LTE. Данная модель состоит из модели размещения и перемещения радиоэлектронных средств (абонентских терминалов) сети. В качестве модели размещения и перемещения АТ предложено использовать формирующий фильтр для изменения координат АТ.

Модель электромагнитных взаимодействий состоит из модели распространения сигналов в линиях связи, которая учитывает мощность передатчика, коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, ослабление в свободном пространстве при изменяющемся расстоянии, коэффициенты полезного действия приемного и передающего фидеров, дополнительное затухание, вызванное влиянием стен, перекрытий этажей, случайную компоненту дополнительного затухания (быстрые и медленные замирания).

Список литературы:

1. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных : учеб. пособие / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. С.-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 204 с.
2. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения теории электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Москва : Радио и связь, 1984. 336 с.
3. Владимиров В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В.И. Владимиров, А.Л. Докторов и др. ; под ред. Н.М. Царькова. Москва : Радио и связь, 1985. 272 с.
4. Петросян Л.А. Игры в развернутой форме: оптимальность и устойчивость / Л.А.Петросян, Д.В. Кузютин. С.-Петербург : СГУ, 2000. 292 с.
5. Певницкий В.П. Статистические характеристики промышленных помех / В.П. Певницкий, Ю.В. Полозок. Москва : Радио и связь, 1988. 248 с.
6. Ремизов Л.Т. Естественные помехи. Москва : Наука, 1985. 200 с.
7. Михайлов А.В. Высокоэффективные оптимальные системы связи. М.: Связь, 1980. 344 с.
8. Коржик В.И. Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой / В.И.Коржик, Л.М.Финк. Москва : Связь, 1975. 277 с.
9. Омельченко В.О. Теорія електричного зв'язку / В.О.Омельченко, В.Г.Санніков. Київ : ІЗМН, 1997. 640 с.
10. Апорович А.Ф. Электромагнитная совместимость РЭС. Ч. 1 9 / А.Ф. Апорович, А.М. Бригин, В.Н. Левкович, В.Г. Устименко, Н.П. Шохов. БГУИР, 1991. 99 с.
11. Альтер Л.Ш. Оценка эффективности нормирования параметров ЭМС приемо-передающей аппаратуры спутниковой подвижной службы // Электросвязь. 1986. №7. С. 52-64.