

УДК 621.396.677.49

# МЕТОД ПРОГНОЗА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ В СЕТЯХ МОБІЛЬНОЇ СВ'ЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА- БЬЮСИ



[Ю.Ю. Коляденко](#), [Н.А. Чурсанов](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – The task of ensuring electromagnetic compatibility becomes particularly relevant for mobile communication networks where a communication channel is often divided among a large number of users. To ensure the electromagnetic compatibility of mobile communication networks, the article suggests analyzing and predicting the electromagnetic environment in real time. It is shown that the model of the electromagnetic environment at a particular point in space is a random process, which is represented by the equation of state. Analysis of the electromagnetic environment is a measurement of the useful signal power and the total interference power and noise at a specific point in space and the calculation of the ratio of the useful signal power to the total interference power and noise. According to the results of measurement and analysis of the ratio of the useful signal power to the total power of interference and noise, the task of predicting the electromagnetic environment is posed. As a method for estimating and predicting the electromagnetic environment, the paper suggests using the Kalman-Bucy filter, which implements the idea of predicting – an adjustment. Using simulation modeling, the analysis of the effectiveness of the forecast method was carried out. The a posteriori error variance is used as a criterion for the effectiveness of the forecast method.

**Анотація** – Розроблено математичну модель електромагнітних взаємодій. Показано, що відношення потужності корисного сигналу до сумарної потужності завад і шуму в конкретній точці простору є випадковим процесом, який можна представити рівнянням стану. Запропоновано метод оцінки та прогнозу електромагнітної обстановки з використанням фільтра Калмана-Б'юсі. У фільтрі Калмана-Б'юсі реалізується ідея передбачення – коригування. За допомогою імітаційного моделювання проведено аналіз ефективності методу прогнозу. Як критерій ефективності методу прогнозу й оцінки використана апостеріорна дисперсія помилки.

**Аннотация** – Разработана математическая модель электромагнитных взаимодействий. Показано, что отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и шума в конкретной точке пространства является случайным процессом, который представим уравнением состояния. Предложен метод оценки и прогноза электромагнитной обстановки с использованием фильтра Калмана-Бьюси. В фильтре Калмана-Бьюси реализуется идея предсказания – корректировки. С помощью имитационного моделирования проведен анализ эффективности метода прогноза. В качестве критерия эффективности метода оценки и прогноза использована апостериорная дисперсия ошибки.

## Введение

С появлением сетей мобильной связи (СМС) сигнально-помеховая обстановка в диапазонах метровых и дециметровых волн стала резко усложняться. Все возрастающее количество радиоэлектронных средств различного назначения приводят к образованию множественного характера электромагнитных взаимодействий между ними [1]. Элементы СМС создают помехи для других элементов сети, которые, в свою очередь, являются объектами помеховых воздействий. Разработано много методов, методик, теоретических обоснований, посвященных улучшению электромагнитной обстановки (ЭМО) в радиолиниях, проблеме обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) [2-9]. Можно считать, что в стационарных условиях, особенно

при дуэльном рассмотрении (передатчик – приемник), задачи ЭМС практически разрешимы. Ситуацию и саму ЭМО в сетях мобильной связи сильно усложняет тот факт, что в эту обстановку вносятся различные часто случайные факторы, носящие трудно прогнозируемый характер [1, 8, 9]. В этих условиях рассчитать заранее ЭМО и решить задачу ЭМС с достаточной точностью не всегда удается, а часто просто невозможно из-за априорной неопределенности.

Задача обеспечения ЭМС становится особенно актуальной для СМС, где канал связи часто разделяется между большим количеством пользователей. Для обеспечения ЭМС СМС необходимо проведение анализа и прогноза ЭМО в реальном масштабе времени. Таким образом, разработка математических моделей электромагнитных взаимодействий, выбор метода оценки и прогноза ЭМО и проведение их анализа является актуальной научной задачей.

Объектом исследования является процесс электромагнитной обстановки в сетях мобильной связи. Предмет исследования составляют модели электромагнитных взаимодействий и метод оценки и прогноза ЭМО. Целью данной работы является разработка модели электромагнитной обстановки и метода оценки и прогноза ЭМО в СМС.

## I. Модель электромагнитной обстановки в сетях мобильной связи

Электромагнитная обстановка характеризуется мощностью полезного сигнала  $P_c$  и суммарной мощностью помех и шума  $P_n$  в конкретной точке пространства и оценивается отношением мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и шума (ОСПШ):

$$h = 10 \lg \frac{P_c}{P_n} .$$

Можно выделить ряд отличительных структурных и функциональных особенностей, характеризующих ЭМО в СМС [1]:

- ограниченная энергетика и протяженность радиолиний, множественный случайный характер межэлементных взаимодействий и механизмов этих взаимодействий, влияющих на то, что ЭМО с трудом поддается учету и контролю;
- топология сети СМС характеризуется явно выраженной динамикой и нестационарностью из-за мобильности абонентских станций, а также кратковременности работы в эфире;
- каналы радиосвязи являются многолучевыми, нестационарными со случайным изменением всех физических параметров;
- выдвигаются все более высокие требования по качеству обслуживания при передаче как речевой, так и мультимедийной информации;
- высокая плотность загрузки выделенных диапазонов частот, случайное положение и размещение групп абонентских станций в пространстве.

Все это позволяет сделать вывод о том, что ОСПШ в конкретной точке пространства является случайным процессом, который представим уравнением состояния [10]:

$$\frac{d\vec{h}(t)}{dt} = F(t)\vec{h}(t) + G(t)\vec{\zeta}(t), \quad (1)$$

где  $\vec{h}(t)$  – вектор состояния ОСПШ, который зависит от времени;  $F(t), G(t)$  – матрицы (коэффициенты для одномерного случая) состояния и возбуждения соответственно;  $\vec{\zeta}(t)$  – порождающее векторное белое гауссовское поле с нулевым средним и спектральной плотностью мощности  $N_{\zeta}$ .

Для стационарного случая коэффициенты  $F, G$  не зависят от времени. Коэффициенты  $F$  имеют физический смысл величин, обратных интервалу корреляции  $\tau_{кор}$  процесса  $h(t)$ . Для одномерного случая

$$F = -\alpha = -\frac{1}{\tau_{кор}}.$$

Коэффициенты  $G$  определяют масштаб случайных изменений процесса  $h(t)$ .

$$G = \sqrt{2\alpha\sigma^2},$$

где  $\alpha = 1/\tau_{кор}$ ;  $\sigma^2$  – спектральная плотность мощности порождающего процесса  $\zeta(t)$ .

Для стационарного одномерного процесса  $h(t)$  уравнение (1) представляется в виде:

$$\frac{dh(t)}{dt} = -ah(t) + \sqrt{2\alpha\sigma^2} \cdot \zeta(t). \quad (2)$$

Для дискретного представления уравнение состояния имеет вид:

$$h(k+1) = F \cdot h(k) + G \cdot \zeta(k), \quad (3)$$

где  $F = \exp\{-\alpha\Delta t_k\}$  – коэффициент состояния,  $\Delta t_k = k - (k-1)$  – шаг,  $G = \sqrt{\sigma^2 \exp\{-\alpha\Delta t_k\}(1 - \exp\{-\alpha\Delta t_k\})}$  – коэффициент порождения.

## II. Метод оценки и прогноза электромагнитной обстановки

Анализ ЭМО представляет собой измерение мощности полезного сигнала и суммарной мощности помех и шума в конкретной точке пространства и расчет ОСПШ. В данном случае по результатам измерения и анализа ОСПШ ставится задача прогноза ЭМО. Такую задачу позволяет решить процедура, получившая название фильтра Колмана-Бьюси [11]. Работа фильтра разделена за два этапа:

1. Экстраполяция (предсказание)
2. Корректировка

Экстраполяция – предсказание значений процесса.

В основе первого этапа работы фильтра лежит модель анализируемого процесса. По ней строится предсказание состояния системы на один шаг вперед:

$$\hat{h}(k) = F\hat{h}(k-1) + B(k)u(k), \quad (4)$$

где  $\hat{h}(k)$  – экстраполированное значение процесса на  $k$ -м шаге,  $\hat{h}(k-1)$  – значение процесса на предыдущем шаге,  $B(k)$  – матрица влияния управляющего воздействия,  $u(k)$  – управляющее воздействие. На практике, как правило, управляющее воздействие неизвестно и упускается, а его воздействие относится к шумам.

Затем предсказывается ошибка ковариации, т.е. решается уравнение для априорной дисперсии:

$$V(k, k-1) = FV(k-1, k-1)F^T + GN_{\zeta}G^T. \quad (5)$$

Корректировка значений процесса

Второй этап работы фильтра начинается с измерения ОСПШ, т.е. фактического состояния процесса  $z(k)$ . Здесь фактически измеренное значение ОСПШ указывается с учетом действительного состояния и погрешности измерений. В данном случае под погрешностью измерений имеются в виду воздействия шумов на процесс.

Таким образом, есть две разные величины, которые представляют состояние одного динамического процесса. Это экстраполированное значение, которое было рассчитано на первом этапе, и фактически измеренное значение. Каждая из этих величин с определенной долей вероятности характеризует истинное состояние процесса, которое, таким образом, находится где-то между ними двумя. Следовательно, целью является доверие тому или иному значению. Для этого и проводятся итерации второго этапа фильтра Калмана.

Исходя из имеющихся данных, определяем отклонение фактического состояния процесса от экстраполированного значения.

$$y(k) = z(k) - H \cdot h(k-1) \cdot F, \quad (6)$$

где  $H(k)$  – матрица измерений, которая отображает зависимость фактического состояния процесса от рассчитанных данных (на практике часто принимает единичное значение).

Затем определяется оптимальное значение коэффициентов усиления, которые и отображают степень доверия расчетной и эмпирической величинам:

$$K(k) = V(k, k-1)H^T N_n^{-1}, \quad (7)$$

где  $N_n$  – значение спектральной плотности мощности шума измерения.

Теперь по уже полученным коэффициентам корректируется значение состояния процесса

$$\hat{h}(k) = F \cdot \hat{h}(k-1) + K(k) \cdot y(k) \quad (8)$$

и рассчитывается ковариационная матрица оценки вектора состояния:

$$V(k, k) = [I - K(k)H] \cdot V(k, k-1), \quad (9)$$

где  $I$  - единичная матрица.



Рис. 1. Структурная схема дискретного фильтра Калмана-Бьюси

На рис. 1 представлена структурная схема фильтра Калмана-Бьюси (8). Анализ структурной схемы (рис. 1) показывает, что в фильтре Калмана-Бьюси реализуется идея предсказания – корректировки. Предыдущая оценка  $\hat{h}(k-1)$  экстраполируется на один шаг вперед и затем используется для получения наилучшей оценки нового наблюдения  $z(k)$ , основанной на предыдущих наблюдениях. Ошибка между «наилучшей оценкой» текущего наблюдения и фактическим наблюдением, а именно  $\Delta h(k) = z(k) - \hat{h}(k)$ , представляют собой новую информацию, а процесс  $\Delta h(k)$  носит название обновляющего. Далее полученная разница взвешивается с весом  $K(k)$ , учитывающим значение дисперсий входного процесса, измерения и ошибки оценивания для формирования сигнала корректировки. Сигнал корректировки складывается с предсказанной оценкой, и в результате получается новая оценка.

С помощью имитационного моделирования проведен анализ эффективности фильтра Калмана-Бьюси (8). На рис. 2 представлены результаты моделирования: истинное значение ОСПШ, наблюдаемое значение ОСПШ и значение прогноза.

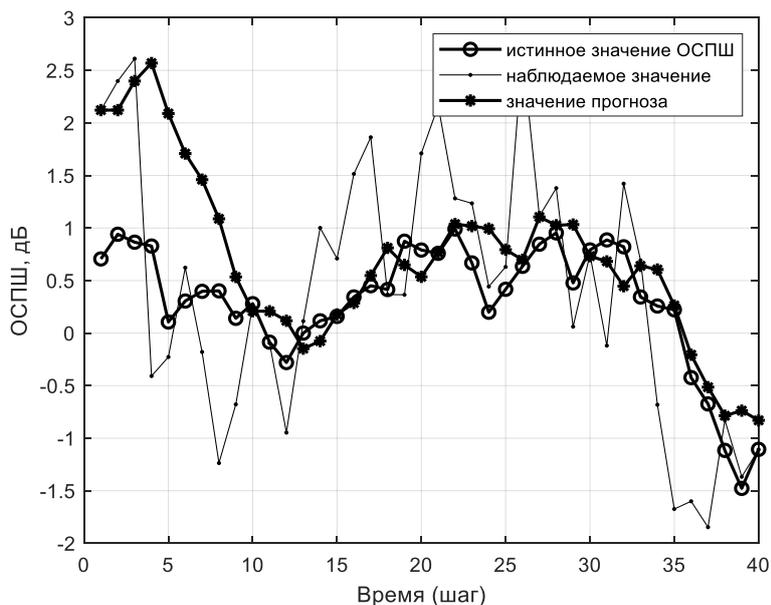


Рис. 2. Результаты моделирования: истинное значение ОСПШ, наблюдаемое значение ОСПШ и значение прогноза

В качестве критерия эффективности фильтра Калмана-Бьюси использована апостериорная дисперсия ошибки, график которой представлен на рис. 3.

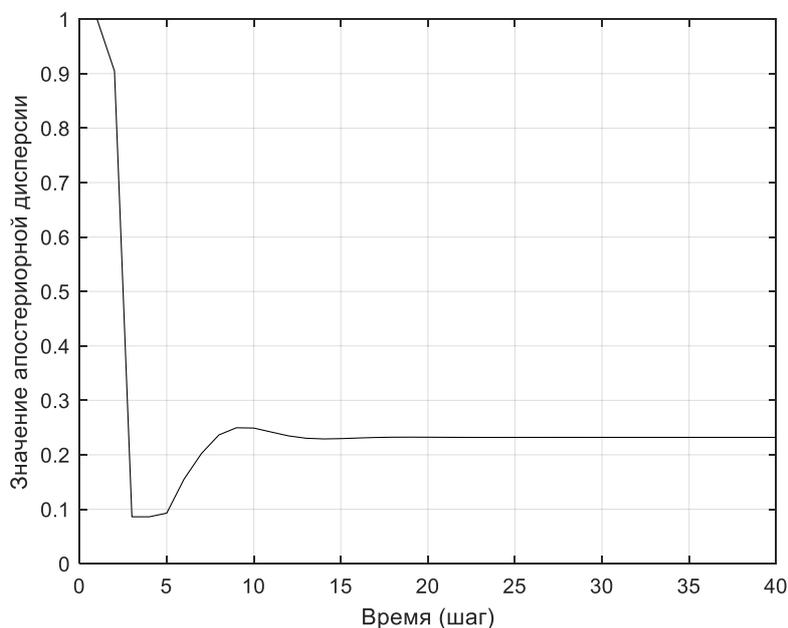


Рис. 3. Апостериорная дисперсия ошибки прогноза и оценки

Из содержания результатов, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что ошибка прогноза в начале работы алгоритма имеет максимальное значение, также имеет переходной режим и за 10 шагов достигает установившегося состояния.

## Выводы

Задача обеспечения электромагнитной совместимости становится особенно актуальной для сетей мобильной связи, где канал связи часто разделяется между большим количеством пользователей. Для обеспечения электромагнитной совместимости сетей мобильной связи в статье предложено проведение анализа и прогноза электромагнитной обстановки в реальном масштабе времени.

Показано, что модель электромагнитной обстановки в конкретной точке пространства является случайным процессом, который представим уравнением состояния. Анализ электромагнитной обстановки представляет собой измерение мощности полезного сигнала и суммарной мощности помех и шума в конкретной точке пространства и расчет отношения мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и шума. По результатам измерения и анализа отношения мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и шума ставится задача прогноза электромагнитной обстановки.

В качестве метода оценки и прогноза электромагнитной обстановки в работе предложено использование фильтра Калмана-Бьюси, в котором реализуется идея предсказания – корректировки. С помощью имитационного моделирования проведен анализ эффективности метода прогноза. В качестве критерия эффективности метода прогноза использована апостериорная дисперсия ошибки.

## Список литературы:

1. Поповский В.В., Коляденко Ю.Ю. Методика анализа электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в группировках систем подвижной связи // Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні питання регулювання у сфері телекомунікацій та користування радіочастотним ресурсом». – Київ, 18-20 травня 2010 р. – С. 115-116.
2. Теория и методы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Под редакцией Ю.А. Феоктистова. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
3. Кантор Л.Я. Универсальный показатель совместимости радиосистем // Электросвязь. – 2004. – №10. – С. 23-25.
4. Бородич С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
5. Бузов А.Л. Предельно допустимые уровни электромагнитного излучения радиосредств сотовых систем подвижной связи/ А.Л. Бузов, Ю.И. Кольчугин, К.В. Шеполова, Ю.П. Пальцев, В.А. Романов // Электросвязь. – 1997. – №10. – С. 24-27.
6. Методика проведення розрахунків електромагнітної сумісності та норми частотно-територіального рознесення радіоелектронних засобів у смугах радіочастот, які підлягають конверсії (1920-1935/2110-2125, 1950-1965/2140-2155, 1965-1980/2155-2170), а також у смугах радіочастот, які плануються для застосування за результатами конверсії. – К.: Адміністрація державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України, 2015 (Нормативний документ Адміністрації державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України).

7. *Седелников Ю.Е.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – М.: Новое знание. – 2006. – 304 с.

8. *Харин А.С., Калугин В.Г.* Исследование возможности обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств сети GSM-900 в диапазоне E-GSM с радиоэлектронными средствами специального назначения // *Электросвязь.* – 2010. – № 11. – С. 8-12.

9. *Приходько В.В., Калугин В.Г., Высочин В.П., Дю К.О.* Некоторые пути решения проблемы обеспечения ЭМС РЭС сетей сотовой связи стандарта GSM-900 и воздушной радионавигации в интересах повышения эффективности использования радиочастотного спектра // Сб. тр. конф. «Актуальные вопросы повышения эффективности использования национального радиочастотного ресурса». – Суздаль, 2006. – С. 34-41.

10. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1991. – 384 с.

11. *Коляденко Ю.Ю., Алали А.М.* Метод оценки параметров радиоканалов сети LTE // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* – 2015. – Vol. 15, No. 2. - P. 32–41. DOI: 10.14529/ctcr150204.