

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ НАРУШЕНИЯ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Введение

С развитием спутниковых систем связи (ССС) на основе низкоорбитальной (LEO) и среднеорбитальной (MEO) группировок ретрансляторов резко ухудшаются условия электромагнитной совместимости (ЭМС) на борту этих ретрансляторов связи (РС) за счет влияния источников радиоизлучений с земли. Одновременно с этим ухудшается электромагнитная обстановка (ЭМО) для наземных радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения из-за воздействий сигналов бортовых передатчиков РС. В значительно меньшей степени это касается ССС, которые используют геостационарные орбиты (GEO). Кроме того, системы LEO и MEO более многочисленны. Так для системы Teledesic планируется использовать 288 РС на наклонных орбитах, то есть для LEO и MEO сама ЭМО оказывается более неблагоприятной, кроме того их космический сегмент значительно больший по количеству ИСЗ [1].

Неблагоприятность ЭМО в этих системах связана с близким расстоянием РС до поверхности земли. Так, уровни сигналов передатчиков P_n , излучаемых антеннами с усилением G_n с расстояний указанных орбит, определяются модулем вектора Пойнтинга:

$$\Pi = \frac{P_n G_n}{2\pi R^2}, \quad (1)$$

где $P_n G_n$ – эквивалентная изотропно излучаемая мощность бортового передатчика РС; R – расстояние до орбиты, $R_{LEO}=700\dots 1000$ км, $R_{MEO}=1000\dots 2000$ км, $R_{GEO}\cong 36000$ км.

В реальных условиях ЭМС нарушается в результате того, что главные лепестки диаграмм направленности многолучевых бортовых антенн РС «наползают» на зону деятельности того или иного РЭС и создают на его входе нежелательные сигналы, пропорциональные по уровню величине (1). Те же РЭС в обратном направлении могут создавать помехи для РС. Таким образом, ЭМО в линиях ССС носит динамический характер. Уровни помех то увеличиваются, превышая допустимые значения $P_{доп}$, то уменьшаются, уходя под собственные шумы приемных трактов. При этом для того или иного РЭС всегда можно указать эти допустимые значения [2].

Постановка задачи

Динамический случайный характер ЭМО можно описать вектором состояния [3]:

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = F(\bar{x}(t), t) = G(\bar{x}(t), t)\bar{\xi}(t), \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0, \quad (2)$$

где \bar{x}_0 – вектор начального состояния; $\bar{x}(t)$ – n -мерный вектор фазовых координатной системы; $F(\cdot)$, $G(\cdot)$ – матрицы соответственно: состояния $F(\cdot)$ и возбуждения $G(\cdot)$; $\bar{\xi}(t)$ – векторный белый шум возбуждения с нулевым математическим ожиданием и матрицей интенсивностей $N(t)$.

Будем считать, что рассмотренная нами система РС и земных станций с ЭМО, описываемой вектором (2), находится в работоспособном состоянии тогда, когда уровни воздействующих помех на входе k -го приемного устройства

$$\Pi_{\Sigma k} = \sum_{i=1}^k \Pi_i, \quad i = \overline{1, k}, \quad i = \overline{1, n} \quad (3)$$

не превышает допустимые значения:

$$P_{np} = \Pi_{\Sigma k} S_{эфк} \geq P_{np доп}, \quad (4)$$

где $S_{эфк} = S \cdot K_{ин}$ – эффективная площадь k -той системы к коэффициентом использования $K_{ин}=0,5\dots 0,8$, $P_{np доп}$ – допустимый уровень принимаемых помех [2].

Обозначим область, в пределах которой система находится в работоспособном состоянии X . При выходе $\bar{x}(t)$ за пределы X происходит нарушение условий ЭМС. Будем считать, что указанная область X представляет собой гиперкуб с m поглощающими границами, $m < n$, а область X определим как:

$$X = \{m : x_m, m = \overline{1, m}\}. \quad (5)$$

Методика нахождения вероятности нарушений условий ЭМС

Учтем тот факт, что неравенство (4) может также нарушаться на коротких интервалах $\Delta t \rightarrow 0$ в результате действия всегда существующих стационарных помех шумового или импульсного характера. Действие таких помех, в силу их кратковременности, не принято трактовать как нарушение условий ЭМС. Нарушение условий ЭМС наступают в силу относительно длительного воздействия $t > \Delta t$ и состоит в том, что система $\bar{x}(t)$, выведенная из равновесного состояния за пределы области X за время $t > \Delta t$, в эту область не возвращается.

Рассмотрим последовательность коротких интервалов времени $\Delta t = t_{l+1} - t_l$, $l = 0, 1, 2, \dots, l$, каждый из которых достаточен для того, чтобы в отношении того или иного РЭС можно определенно утверждать, что состояние $\bar{x}(t)$ – характеризуется как нарушение ЭМС, а не просто кратковременное воздействие случайной помехи.

Целесообразно рассматривать две характерные на практике ситуации:

1. Когда процесс выхода системы $\bar{x}(t)$ за пределы области X на m -х границах этой области является несовместным, то есть, когда нарушение ЭМС обусловлено одним источником помех в одном каком-либо из числа n приемников;

2. Когда данный процесс на этих границах представляет собой наступление совместных событий или когда за соответствующие допустимые границы одновременно выходит более одной компоненты вектора $\bar{x}(t)$, и система в равновесное стационарное состояние не возвращается в течение заданного интервала Δt .

Для первого случая, при нарушении ЭМС одного приемника и воздействии одной помехи на каждом временном интервале Δt получим выражение для вероятности этого нарушения $P_{ЭМС}(t_{l+1} - t_l)$ с учетом нахождения вектора $\bar{x}(t)$ вне указанной области $P_x(t_l)$ и вероятности невозвращения $\bar{x}(t)$ в данную область $P_n(t_l + \Delta t | \bar{x}(t_l) \notin X)$ за время Δt при условии, что состояние $\bar{x}(t)$ в момент t_l определено вне области X . Независимость этих событий выражается следующим образом:

$$P_{ЭМС}(t_{l+1} - t_l) = P_x(t_l)P_n(t_l + \Delta t | \bar{x}(t_l) \notin X). \quad (6)$$

Определим вероятность P_x и P_n . Воспользуемся методикой анализа марковских процессов [3, 4]. Вероятность нахождения $\bar{x}(t)$ внутри области X равна интегралу по этой области:

$$P_o = \int_x f(\bar{x}(t), t) dx, \quad (7)$$

где $f(\bar{x}(t), t)$ – n -мерная плотность вероятности распределения случайного процесса $\bar{x}(t)$ в открытой области.

Значение P_n определим на основании выражения (7) как дополнение:

$$P_n(t_l) = 1 - P_o = 1 - \int_x f(\bar{x}, t_l) dx.$$

В общем случае $f(\bar{x}(t), t)$ – находится из решения уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова вида:

$$\frac{\partial f(\bar{x}(t), t)}{\partial t} = -div \pi(\bar{x}(t), t), \quad f(\bar{x}(t), t_o) = f_o(x_o), \quad (8)$$

где $\pi(\bar{x}(t), t)$ – вектор плотности потока вероятности,

$$\pi(\bar{x}(t), t) = A(\bar{x}(t), t)f(\bar{x}(t), t) - \frac{1}{2} \left[\nabla_x^T B(\bar{x}(t), t)f(\bar{x}(t), t) \right], \quad (9)$$

где $A(\dots)$, $B(\dots)$ – матрицы сноса и диффузии процесса $\bar{x}(t)$, соответственно.

Сама плотность $f(\dots)$ может иметь произвольное распределение, однако решение при этом получить не удастся. Приближенное [3, 4] решение основывается на предположении о гауссовском характере $f(\dots)$. Такое предположение может быть в данном случае принято. Действительно, если под состоянием $\bar{x}(t)$ будем понимать величину разности уровней принимаемых сигналов $P_{np \Sigma}$ и $P_{np \partial on}$, то

$$\bar{x}(t) = P_{np \Sigma} - P_{np \partial on}. \quad (10)$$

Данная разность может считаться приближенно гауссовой. Далее, используя метод статистической линеаризации [3, 4], ограничимся рассмотрением математического ожидания: $M_x(t) = M[\bar{x}(t)]$ и дисперсии $\sigma_x^2(t) = M[\bar{x}^o(t)\bar{x}^{oT}(t)]$.

Вероятность невозвращения $P_n(\cdot)$ в заданную область X получим из решения обобщенного уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова [4]:

$$P_n(t_l + \Delta t | \bar{x}(t_l) \notin X) = \exp \left[- \int_{t_l}^{t_l + \Delta t} v(t) dt \right], \quad (11)$$

где $v(t)$ – функция поглощения реализаций $\bar{x}(t)$, численно равная плотности потока вероятностей непоглощающих реализаций, полученных на краю области X [4, 5]:

$$v(e) = \pi(X, t). \quad (12)$$

Плотность потока $\pi(\cdot)$ может быть получена из уравнения (9) подстановкой вместо $f(x, t)$ плотности распределения не поглощенных реализаций процесса $\bar{x}(t)$, представляющей собой усеченное гауссово распределение в области X .

С учетом изложенного, вероятность $P_{ЭМС}$ на момент времени t_l по формуле полной вероятности имеет вид:

$$P_{ЭМС}(t_l) = 1 - \prod_{l=1}^l \left\{ 1 - \left[\sum_{i=1}^m P_x^{(j)}(t_l) P_n^{(i)}(t_l + \Delta t | \bar{x}(t_l) \notin X) \right] \right\}. \quad (13)$$

Формула (13) может использоваться в тех случаях, когда нарушения условий ЭМС достаточно редкие события, удовлетворяющие принятому выше выражению о несовместности двух или более событий выхода системы $\bar{x}(t)$ за границы области X .

В качестве альтернативного варианта следует рассматривать случай, когда выход $\bar{x}(t)$ за 2 и более границ представляет собой события совместные, то есть когда в двух или более направлениях связи нарушаются условия ЭМС. Рассматривая каждое такое событие как дополнение к (6) и переход к произведению совместных этих событий, получим искомую вероятность:

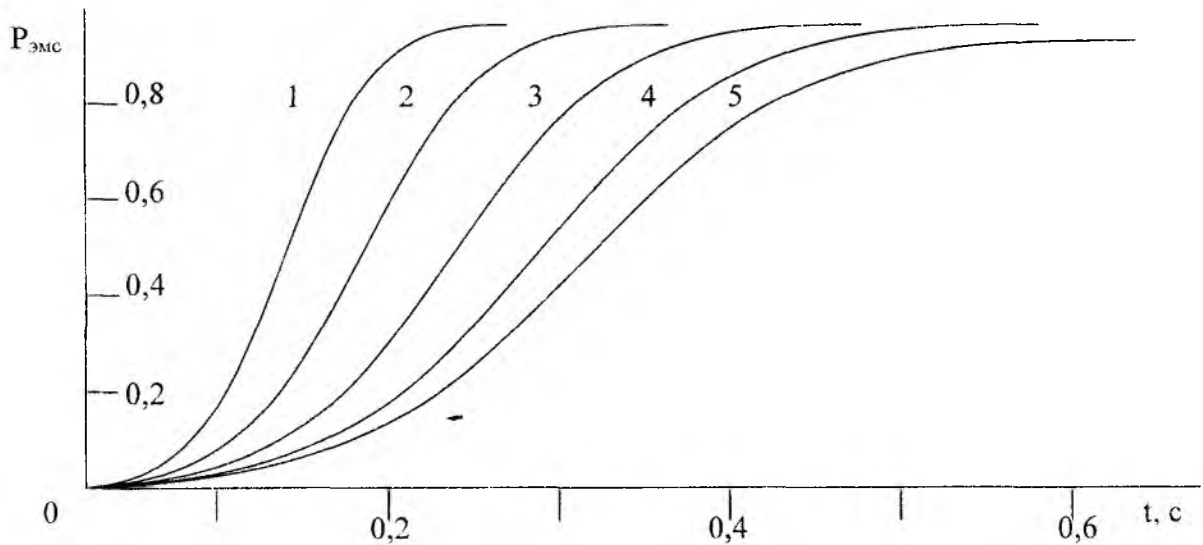
$$P_{ЭМС}(t_l) = 1 - \prod_{l=1}^l \prod_{j=1}^m \left\{ 1 - P_x^{(j)}(t_l) P_n^{(j)}(t_l + \Delta t | \bar{x}(t_l) \notin X) \right\}. \quad (14)$$

Очевидно выражения (13 и 14) являются неубывающими дискретными функции моментов времени t_l и являются искомыми выражениями для анализа соответственно: уравнение (13) для редких событий, нарушающих условия ЭМС и уравнение (14) – для событий достаточно частых, когда вероятность нарушений ЭМС происходит в двух и более направлениях связи.

В качестве примера рассмотрим дуэльную ситуацию, возникающую на входе одного приемника. Состояние СПО определяем стохастическим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha x(t) + \xi(t), \quad x(t_0) = 0, \quad (15)$$

где $\xi(t)$ – гауссов порождающий белый шум с нулевым средним и интенсивностью N_0 . Плотность распределения вероятностей $x(t)$ – гауссовская. Область X определим, как $X_n \leq X \leq X_a$. Для исходных данных: $\alpha = -3$; $N_0 = 2$; $t_0 = 0$; $t_1 = 1$; $X_n = -0,5$, $X_a = 0,5$ были проведены расчеты вероятности $P_{\text{ЭМС}}(t)$, результаты которых представлены на рисунке. Кривые под номерами 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют интервалам Δt , равным 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05.



Выводы

1. Разработанная методика анализа вероятности нарушения условий ЭМС в ССС позволяет осуществить количественную и качественную оценку ЭМО в зависимости от параметров и характера взаимодействий в системе.

2. Численный анализ показывает, что точность методики возрастает для коротких интервалов времени t_1 по сравнению со временем наблюдения системы.

Список литературы: 1. Невдяев Л.М., Смирнов А.А. Персональная спутниковая связь. М: Экотрендз, 1998. 2. Аль-Михлафи Мурад. Методы расчета допустимых помех, действующих в спутниковых системах связи. // Радиотехника. 2000. Вып.113. С.18–21. 3. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608с. 4. Казаков И.Е., Мальчиков С.В. Анализ стохастических систем в пространстве состояний. М: Наука, 1983. 303с. 5. Лобатый А.А. Вероятностный анализ срыва управлений в итерационной автоматической системе. Известия АН СССР. Техн.кибернетика. № 4. 1989. С.116–119.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 09.11.2000