

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ХАОТИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ РАДИОПОМЕХ В ЦЕХАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

У статті представлені результати теоретичних досліджень спектральних і амплітудних характеристик хаотичних послідовностей імпульсів індустріальних радіозавод. Дослідження виконані методом спектрального аналізу та статистичної радіотехніки. Виконані дослідження та їх результати можуть використовуватися при проектуванні радіомодемів систем промислової автоматизації

Ключові слова: радіозавада, хаотична послідовність, спектр, математичне очікування, розподіл амплітуд, моменти появи

В статье представлены результаты теоретических исследований спектральных и амплитудных характеристик хаотических последовательностей импульсов индустриальных радиопомех. Исследования выполнены методом спектрального анализа и статистической радиотехники. Выполненные исследования и их результаты могут использоваться при проектировании радиомодемів систем промышленной автоматизации

Ключевые слова: радиопомеха, хаотическая последовательность, спектр, математическое ожидание, распределение амплитуд, моменты появления

К. Н. Полтавский*

Контактный тел.: 095-775-55-61

E-mail: poltava9_1@mail.ru

Г. И. Сидоров

Кандидат технических наук, профессор

Кафедра радиоэлектронных систем*

Контактный тел.: 067-793-36-46

E-mail: gennady.sydorov@gmail.com

*Харьковский национальный университет
радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

В настоящее время повышение производительности труда на современных производствах с одновременным повышением качества продукции возможно только при использовании высокоэффективных автоматизированных систем управления технологическими процессами. До последнего времени в большинстве случаев связь между пунктами управления и исполнительными механизмами осуществлялась с использованием кабельных линий, которые обеспечивают высокую скорость передачи информации благодаря отсутствию влияния индустриальных помех в отличие от радиоканалов, когда наличие интенсивных радиопомех внутри цехов промышленных предприятий не позволяет достичь необходимой скорости передачи. В последние годы фирмы «Siemens», «JE Fanuc» и ряд других разрабатывают и производят радиомодемы, в которых благодаря применению помехоустойчивых кодов и сигнально-кодовых конструкций достигнута необходимая скорость передачи. При разработке новых эффективных сигнально-кодовых конструкций и выборе видов модуляции необходимо учитывать амплитудные и спектральные характеристики индустриальных радиопомех в цехах промышленных предприятий.

Это определяет актуальность исследований, результаты которых представлены в статье.

2. Постановка задачи исследования потока индустриальных радиопомех

Чтобы определить минимальный уровень полезного сигнала, необходимого для удовлетворительного радиоприема, необходимо знать при каких помехах он будет приниматься.

Существует много видов помех, которые могут влиять на прием, хотя на определенной линии связи обычно преобладает только один вид. Помехи можно разделить на две категории в зависимости от того, создаются ли они в самой приемной системе или поступают извне на антенну.

Внутренние помехи обуславливаются процессами в усилительных элементах, флуктуационными процессами в радиодеталях и имеют характер тепловых шумов. Во многих случаях их влияние на прием сигналов можно определить математически с большой точностью.

К внешним помехам относятся атмосферные и индустриальные помехи, а также космические шумы.

В зависимости от рабочего диапазона частот при анализе радиоприема достаточно учитывать либо внутренние, либо внешние помехи. Так, в работе [1] указывается, что на частотах выше 800 МГц внутренние шумы существенно превышают уровень внешних помех, а на более низких частотах преобладают внешние помехи.

В данной работе рассматриваются только промышленные радиопомехи, так как внутри зданий промышленных предприятий из армированного железобетона уровень помех от работающего электрооборудования во много раз превышает уровни помех всех других видов.

Импульсы помех от указанных источников создают в окружающем пространстве высокочастотное электромагнитное поле, при этом уровень последнего зависит не только от спектральных характеристик самих импульсов, но и от характеристик излучения помехообразующих элементов. Если на декаметровых волнах для эффективного излучения необходимы достаточно большие металлические поверхности, образующие паразитные колебательные контуры, то в диапазоне метровых и дециметровых волн помехи могут излучаться за счет возбуждения при пробоях небольших зазоров между металлическими поверхностями, трещин в изоляторах и т.п., что эквивалентно излучению открытого контура.

3. Спектральная характеристика хаотической последовательности радиоимпульсов

Для описания воздействия суммарной радиопомехи на радиоприемные устройства необходимо знать ее спектральную характеристику и закон распределения амплитуд.

С точки зрения электрической структуры электромагнитное поле радиопомех в любой точке цеха вызывается случайной последовательностью импульсов, создаваемых различными источниками. Импульсы такой хаотической последовательности могут быть неперекрывающимися и перекрывающимися. Если неперекрывающиеся импульсы воздействуют на инерционную систему (радиоприемное устройство), то на выходе такой системы получаются перекрывающиеся импульсы. Поэтому промышленные помехи классифицируют как “квазиимпульсный шум”, означающий помеху промежуточного типа между двумя крайними типами – “тепловым шумом”, представляющим собой флуктуационный процесс, и чисто импульсным шумом.

Рассматриваемый случайный импульсный процесс может быть записан в виде суммы

$$\xi(t) = \sum_1^{N_i} N_i \cdot a_i \cdot f_i(t - t_i). \tag{1}$$

Здесь N_i – число элементарных импульсов (возмущений), возникающих за достаточно малый интервал времени Δt_i , t_i – случайный момент появления i -го возмущения, имеющего детерминированную форму $a_i \cdot f_i(t - t_i)$, где $f_i(t - t_i) = 0$ при $t < t_i$, а случайные амплитудные множители a_i и функции f_i учитывают неодинаковость всех элементарных возмущений по форме и интенсивности. Длительность каждого возмущения может быть как конечной, так и бесконечной. Случайные величины a_i , N_i и t_i считаются статистически взаимно независимыми.

Амплитудный спектр суммарной радиопомехи, вызываемой случайными независимыми источниками, может быть найден при введении следующих упрощающих предположений:

1) все источники помех идентичны и, следовательно, переходные процессы на их зажимах одинаковы;

2) моменты появления импульсов помех распределены по закону Пуассона.

Текущий спектр импульсной последовательности (1) найдем, используя основные теоремы о спектрах. Обозначим время сдвига начала i -го импульса относительно начала импульса, совпадающего с $t = 0$, через τ_i , а случайные амплитуды через a_i . Тогда

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= a_0 S_0(j\omega) + a_1 S_0(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_1} + \\ &+ a_2 S_0(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_2} + \dots + a_{\frac{N-1}{2}} S_0(j\omega) \cdot e^{-j\omega \frac{\tau_{N-1}}{2}} + \\ &+ a_1 S_0(j\omega) \cdot e^{j\omega\tau_1} + a_2 S_0(j\omega) \cdot e^{j\omega\tau_2} + \dots + \\ &+ a_{\frac{N-1}{2}} S_0(j\omega) \cdot e^{j\omega \frac{\tau_{N-1}}{2}}. \end{aligned} \tag{2}$$

Обозначая интервал времени между моментами появления двух последовательных импульсов $\theta_i = \tau_i - \tau_{i-1}$, получим

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= a_0 S_0(j\omega) + a_1 S_0(j\omega) \cdot e^{-j\omega\theta_1} + \\ &+ a_2 S_0(j\omega) \cdot e^{-j\omega\theta_1} \cdot e^{-j\omega\theta_2} + \\ &+ \dots + a_{\frac{N-1}{2}} S_0(j\omega) \cdot \prod_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} e^{-j\omega\theta_i} + a_1 S_0(j\omega) \cdot e^{j\omega\theta_1} + \\ &+ a_2 S_0(j\omega) \cdot e^{j\omega\theta_1} \cdot e^{j\omega\theta_2} + \dots + a_{\frac{N-1}{2}} S_0(j\omega) \cdot \prod_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} e^{j\omega\theta_i} = \\ &= a_0 S_0(j\omega) + S_0(j\omega) \sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} a_i \prod_i e^{-j\omega\theta_i} + S_0(j\omega) \sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} a_i \prod_i e^{j\omega\theta_i}. \end{aligned} \tag{3}$$

Математическое ожидание текущего спектра

$$\begin{aligned} M[S(j\omega)] &= \bar{a} \cdot S_0(j\omega) + S_0(j\omega) \cdot M \left[\sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} a_i \cdot \prod_i e^{-j\omega\theta_i} \right] + \\ &+ S_0(j\omega) \cdot M \left[\sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} a_i \cdot \prod_i e^{j\omega\theta_i} \right] = \\ &= \bar{a} S_0(j\omega) \cdot \left\{ 1 + \sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} M \left[\prod_i e^{-j\omega\theta_i} \right] + \sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} M \left[\prod_i e^{j\omega\theta_i} \right] \right\}, \end{aligned} \tag{4}$$

где \bar{a} – среднее значение амплитудного множителя, \bar{N} – среднее число импульсов на интервале наблюдения T , $S_0(j\omega)$ – спектр одиночного радиоимпульса.

Из статистической независимости θ_i следует статистическая независимость любых значений $e^{-j\omega\theta_i}$ и $e^{j\omega\theta_i}$.

Следовательно

$$M \left[\prod_i e^{-j\omega\theta_i} \right] = \prod_i M \left[e^{-j\omega\theta_i} \right], \tag{5}$$

$$M\left[\prod_i e^{j\omega\theta_i}\right] = \prod_i M\left[e^{j\omega\theta_i}\right], \quad (6)$$

$$\begin{aligned} M[S(j\omega)] &= \bar{a} \cdot S_0(j\omega) \cdot \{1 + M[e^{-j\omega\theta_1}] + \\ &+ M[e^{-j\omega\theta_1}] \cdot M[e^{-j\omega\theta_2}] + \dots + \prod_{i=1}^{\frac{\bar{N}-1}{2}} M[e^{-j\omega\theta_i}] + \\ &+ M[e^{j\omega\theta_1}] + M[e^{j\omega\theta_1}] \cdot M[e^{j\omega\theta_2}] + \dots + \prod_{i=1}^{\frac{\bar{N}-1}{2}} M[e^{j\omega\theta_i}]\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Если моменты появления импульсов распределены по закону Пуассона, то интервалы между моментами появления последовательных импульсов имеют экспоненциальное распределение с плотностью вероятности $w(\theta) = v \cdot e^{-v\theta}$, где v – среднее число появлений импульсов в единицу времени (параметр закона Пуассона).

Тогда

$$M[e^{-j\omega\theta_i}] = \int_0^{\infty} w(\theta) \cdot e^{-j\omega\theta} d\theta = v \cdot \int_0^{\infty} e^{-(v+j\omega)\theta} d\theta = \frac{v}{v+j\omega}, \quad (8)$$

$$M[e^{j\omega\theta_i}] = \frac{v}{v-j\omega}, \quad (9)$$

$$\prod_i M[e^{-j\omega\theta_i}] = \prod_i \frac{v}{v+j\omega} = \left(\frac{v}{v+j\omega}\right)^i,$$

$$\prod_i M[e^{j\omega\theta_i}] = \left(\frac{v}{v-j\omega}\right)^i,$$

$$\begin{aligned} M[S(j\omega)] &= \bar{a} S_0(j\omega) \cdot \left[1 + \frac{v}{v+j\omega} + \left(\frac{v}{v+j\omega}\right)^2 + \dots + \left(\frac{v}{v+j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}} + \frac{v}{v-j\omega} + \left(\frac{v}{v-j\omega}\right)^2 + \dots + \left(\frac{v}{v-j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}}\right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Пользуясь формулами для суммы геометрической прогрессии, получим:

$$\begin{aligned} [S(j\omega)] &= \bar{a} S_0(j\omega) \cdot \left[1 + \frac{v}{v+j\omega} \cdot \frac{1 - \left(\frac{v}{v+j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}}}{1 - \frac{v}{v+j\omega}} + \frac{v}{v-j\omega} \cdot \frac{1 - \left(\frac{v}{v-j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}}}{1 - \frac{v}{v-j\omega}}\right] = \bar{a} S_0(j\omega) \cdot 1 + \\ &+ \left[\frac{1 - \left(\frac{v}{v+j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}}}{j \frac{\omega}{v}} + \frac{1 - \left(\frac{v}{v-j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}}}{-j \frac{\omega}{v}}\right] = \bar{a} S_0(j\omega) \cdot \left\{1 - j \frac{v}{\omega} \left[\left(\frac{v}{v+j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}} - \left(\frac{v}{v-j\omega}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}}\right]\right\} = \\ &= \bar{a} S_0(j\omega) \cdot \left\{1 - j \frac{v}{\omega} \left[\left(\frac{v}{\sqrt{v^2 + \omega^2}}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}} e^{-j \frac{\bar{N}-1}{2} \arctg \frac{\omega}{v}} - \left(\frac{v}{\sqrt{v^2 + \omega^2}}\right)^{\frac{\bar{N}-1}{2}} e^{j \frac{\bar{N}-1}{2} \arctg \frac{\omega}{v}}\right]\right\} = \bar{a} S_0(j\omega) \cdot \left\{1 + \frac{2 \sin\left(\frac{\bar{N}-1}{2} \arctg \frac{\omega}{v}\right)}{\frac{\omega}{v} \left[1 + \left(\frac{\omega}{v}\right)^2\right]^{\frac{\bar{N}-1}{4}}}\right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Построим графики при $\frac{\omega}{v} = 1, 2, 3, 4$ меняя соотношение $\bar{N} = 1, 2, 3, 4$

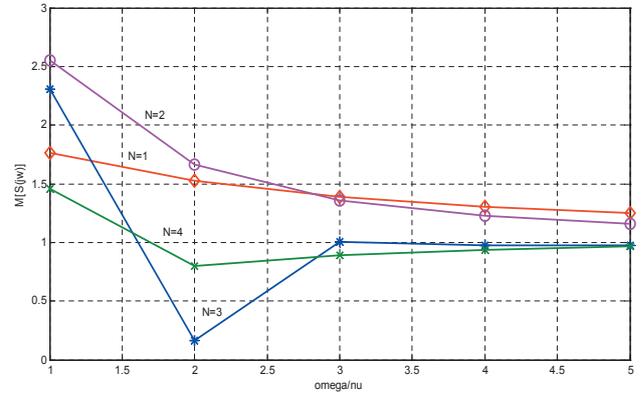


Рис. 1. Зависимость математического ожидания спектра от параметров

Из последнего выражения видно, что при большом \bar{N} за время наблюдения и $\frac{\omega}{v} \gg 1$, что всегда имеет место в интересующем нас диапазоне частот, множитель в фигурных скобках равен единице.

Следовательно, спектр рассмотренной случайной импульсной последовательности сплошной и в области высоких частот полностью тождественен спектру одиночного импульса.

4. Распределение амплитуд хаотической последовательности радиоимпульсов

Как уже указывалось ранее, промышленные радиопомехи представляют собой хаотические последовательности импульсов со случайными амплитудами. Предположим, что большое число N независимых импульсов ξ_1, \dots, ξ_N действует на некоторое радиоприемное устройство в порядке возрастания их импульсов. Обозначим через x_i суммарный эффект, достигнутый в результате действия импульсов ξ_1, \dots, ξ_i .

В некоторых случаях можно считать, что прирост, вызванный индексом ξ_{i+1} , достаточно мал и пропорционален ξ_{i+1} и некоторой функции $g(x_i)$:

$$x_{i+1} - x_i = \xi_{i+1} \cdot g(x_i). \tag{12}$$

Рассмотрим сумму

$$\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N = \sum_0^{N-1} \frac{x_{i+1} - x_i}{g(x_i)}. \tag{13}$$

Так как прирост от каждого импульса мал, то приближенно

$$\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N = \int_{x_0}^x \frac{dS}{g(S)}, \tag{14}$$

где $x = x_N$ обозначает окончательный эффект, а x_0 – начальное значение.

Согласно центральной предельной теореме Ляпунова при большом числе N независимых импульсов ξ_i сумма (14) будет распределена нормально. Полагая $g(S) = S$ (прирост от каждого импульса прямо пропорционален уже накопившемуся эффекту и воздействию импульсу), получим, что величина $\lg x$ распределена нормально. Поэтому случайная величина x называется распределенной логарифмически нормально.

При исследованиях радиопомех измеряемой величиной x является огибающая напряженности поля, обозначая которую через E , можно записать выражение для плотности вероятности

$$w(\lg E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\lg E}} \cdot e^{-\frac{(\lg E - \overline{\lg E})^2}{2\sigma_{\lg E}^2}}. \tag{15}$$

Применимость логарифмически нормального закона для аппроксимации амплитудных характеристик импульсных помех на выходе избирательного устройства с переменной полосой пропускания отмечается также в работах [2, 3].

Во многих практических случаях расчетов помехоустойчивости линий радиосвязи удобно выражать уровни сигналов и помех в децибелах относительно некоторого фиксированного уровня.

Найдем выражение для плотности вероятности логарифмически нормального закона распределения в этом случае.

Обозначая $\lg E = z$, получим $w(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\frac{(z - \bar{z})^2}{2\sigma_z^2}}$.

Амплитуда напряженности поля в децибелах $y = 20 \cdot \lg E$. Видно, что $y = Cx$. В соответствии с задачей преобразования переменных [4], будем искать $w(y)$ по формуле:

$$w(y) = w[\varphi(y)] \cdot \varphi'(y), \tag{16}$$

где $\varphi(y) = z$, $z = \frac{y}{C}$, $\varphi'(y) = \frac{1}{C}$,

$$w(y) = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\frac{(y - \bar{y})^2}{2C^2 \sigma_z^2}}. \tag{17}$$

Учитывая одно из основных свойств дисперсии $D(C \cdot z) = C^2 \cdot D(z)$, найдем $\sigma_z^2 = \frac{\sigma_y^2}{C^2}$.

Подставим полученное значение в выражение (15):

$$w(y) = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \frac{\sigma_y}{C}} \cdot e^{-\frac{(y - \bar{y})^2}{2C^2 \frac{\sigma_y^2}{C^2}}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y} \cdot e^{-\frac{(y - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2}}. \tag{18}$$

Заменяя у его значением в децибелах $y = E_{(дб)}$, окончательно имеем

$$w(E_{дб}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{E_{дб}}} \cdot e^{-\frac{(E_{дб} - \overline{E_{дб}})^2}{2\sigma_{E_{дб}}^2}}. \tag{19}$$

Следовательно, на выходе измерителя радиопомех распределение выраженных в децибелах мгновенных значений огибающей суммарной помехи описывается нормальным законом. Последнее обстоятельство позволяет применить для обработки результатов наблюдений хорошо разработанные в математической статистике методы оценок нормально распределенной случайной величины.

Основной особенностью логарифмически нормального распределения является его асимметричность. Следует также указать на то, что отношение действующего значения логарифмически нормального шума к среднему значительно больше, чем у релеевого или нормального шума.

Это объясняется тем, что в напряжении индустриальных радиопомех большие выбросы встречаются значительно чаще, чем при нормальном шуме. Некоторые типы индустриальных радиопомех как бы состоят из нормального шума, перемешанного с импульсным шумом, при этом частота следования импульсов последнего подчиняется случайному закону. Большинство источников помех промышленного происхождения создает импульсные помехи. Как показано в работах [5], логарифмически нормальное распределение амплитуд имеют такие источники помех, как коллекторные электрические машины, электромагнитные прерыватели тока, системы зажигания двигателей внутреннего сгорания, газосветные лампы и т.п., причем число выбросов импульсных помех в единицу времени, создаваемых этими источниками, колеблется в пределах 1000 – 9000 имп/сек.

5. Вывод

В статье с использованием методов статистической радиотехники разработана обобщенная спектральная модель хаотической последовательности импульсов индустриальных радиопомех в цехах промышленных предприятий. Получен амплитудный спектр суммарной радиопомехи, вызываемой случайными независимыми источниками в предположении, что моменты появления импульсов распределены по закону Пуассона, а интервалы между моментами появления имеют экспоненциальное распределение, найдено математическое ожидание спектра и спектральные зависимости при различной средней частоте появления импульсов. Доказано, что мгновенные значения огибающей суммарной радиопомехи распределены по логарифмически нормальному закону, что коррелирует с результатами исследований других авторов. Полученные результаты будут полезны при проектировании сигнально – кодовых конструкций, применяемых в радиомодемах систем промышленной автоматизации.

Литература

1. Трифонов, П.М. Радиопомехи низовой связи в городе [Текст] : учеб. / П.М. Трифонов, В.Н. Макаров, Е.В. Марциновский. – М. : Электросвязь, 1964. – 201 с.
2. Венчковский, Л.Б. Помехи в каналах телемеханики [Текст] : / Л.Б. Венчковский. – К. : Энергия, 1983. – 186 с.
3. Вольницкий, В.Н. О статистических распределениях импульсов радиопомех, создаваемых электроустройствами [Текст] : учеб. / В.Н. Вольницкий, А.Г. Француз. – М. : Электросвязь, 1968. – 164 с.
4. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] : / Б.Р. Левин. – М. : Советское радио, 1989. – 656 с.
5. Белов, П.В. Статистическая радиотехника [Текст] : учеб, пособие / П.В. Белов, А.В. Назаркин, Э.М. Черниговская ; МГТУ : – Б.м., 2005. – 88с. – (Университетская книга).

Abstract

Investigation of statistical radio signals characteristic and radio interferences is necessary to design industrial wireless modems. Since inner radio interferences in armored concrete workhalls is close to zero, it is necessary to analyze only individual radio interferences that influence on radio receiver device. In given work was investigated amplitude of a chaotic pulse sequence of industrial interferences with random occurrence by Poisson law. It is assumed that duration of occurrence and amplitude is random. Current spectrum of chaotic sequence is found with the main theorem of spectra. It was found mathematic expectation of spectrum with exponential distribution of the interval between pulses appearance. It is proved that the cumulative effect of chaotic sequence of overlapping pulses RFI that influenced to radio receiver describes by log-normal law

Keywords: *interference, chaotic sequence range, the expectation, the distribution of the amplitudes, the time of occurrence*

При дослідженні томографічних властивостей систем візуалізації гамма-випромінювання з кодованими апертурами (емісійні гамма-томографи) виникло питання про вплив процесів взаємодії гамма-квантів з речовиною на якість відновлюваного зображення. В роботі описуються принципи відновлення томографічної інформації, надаються результати програмно-імітаційного моделювання точкових джерел іонізуючого випромінювання в полі повного кодування

Ключові слова: *кодовані апертури, декодування, програмно-імітаційне моделювання*

При исследовании томографических свойств систем визуализации гамма-излучения с кодированными апертурами (эмиссионные гамма-томографы) возник вопрос о влиянии процессов взаимодействия гамма-квантов с веществом на качество восстанавливаемого изображения. В данной работе описываются принципы восстановления томографической информации, приводятся результаты программно-имитационного моделирования по декодированию местоположения точечных источников ионизирующего излучения в поле зрения полного кодирования

Ключевые слова: *кодированные апертуры, декодирование, программно-имитационное моделирование*

УДК 621.4.001; 624.4.001.57

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ С КОДИРОВАННЫМИ АПЕРТУРАМИ

А.А. Никуляк

Младший научный сотрудник
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Искра»
ул. Звейнека, 145 с, г. Луганск, Украина,
91033

Контактный тел.: 066-989-57-21

E-mail: official@iskra.lugansk.ua,

alenik-k@mail.ru

1. Введение

Из теории кодированных апертур известно, что такие системы позволяют получить идеальную функцию

рассеяния точки [1], однако это достижимо для случая, когда источник находится на большом расстоянии. При работе в ближнем поле (когда лучи, исходящие из одной точки, нельзя считать параллельными)