

УДК 621.396

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В РЛС С ЦИФРОВЫМ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЕМ

Зин Аунг, магистрант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Приведено краткое описание математической модели и алгоритмов оценивания угловых координат в радиолокационных средствах (РЛС) с цифровым диаграммообразованием (ЦДО). Методом математического моделирования исследована точность и эффективность алгоритмов оценивания угловых координат в беспомеховых условиях и условиях воздействия помех.

Ключевые слова. Радиолокационная система, цифровое диаграммообразование, угловые координаты, алгоритмы оценивания, пространственная обработка сигналов, математическое моделирование, точность пеленгации.

Введение

Современные радиолокационные системы (РЛС) с цифровым диаграммообразованием (ЦДО) обеспечивают высокую точность определения угловых координат целей за счет адаптивного формирования диаграмм направленности приемных каналов [1-3]. Такие системы широко применяются в условиях интенсивных помех и многолучевого распространения сигналов, где традиционные методы пеленгации оказываются недостаточно эффективными [3, 4].

Ключевым преимуществом ЦДО является возможность динамической оптимизации параметров антенной системы, включая подавление мешающих сигналов. Однако эффективность работы РЛС в значительной степени зависит от выбора алгоритмов оценивания угловых координат, которые должны обеспечивать высокую точность при минимальных вычислительных затратах.

Цель статьи – исследование точности алгоритмов оценивания угловых координат в РЛС с цифровым диаграммообразованием методом математического моделирования и анализ влияния внешних помех на эффективность работы алгоритмов.

Краткое описание компьютерной модели для исследования эффективности оценивания угловых координат в радиолокационном средстве с цифровым диаграммообразованием

Структурная схема компьютерной модели радиолокационной станции с цифровым формированием диаграммообразованием в среде MatLab представлена на рисунке 3.1. Модель включает в себя следующие компоненты:

- модель многоканальной антенной системы;
- модель полезного сигнала;
- модели внешних помех и внутренних шумов;
- модель первичной обработки;
- блок оценки угловых координат;
- блок статистики и визуализации.

Модель многоканальной антенной системы служит основой для формирования принимаемой реализации в РЛС с ЦДО представляет собой аналитические выражения для расчета вектора $\mathbf{f}(\alpha, \beta) = (f_1, \dots, f_N, \dots)$ диаграмм направленности N -канальной антенной системы на базе антенной решетки с выделением их нее N субрешеток. Геометрия моделируемой антенной системы задается следующими параметрами: числом элементов субрешетки по азимуту и углу места, числом субрешеток по азимуту и углу места, межэлементным расстоянием и т.д.

В модели принимаемой реализации с использованием расчетных соотношений [3, 6] с учетом угловых координат отраженного сигнала (цели), источников помех и геометрии антенной системы воспроизводится многоканальная принимаемая реализация. Выход модели – матрица \mathbf{X} отсчетов принимаемого сигнала на выходах приемного канала с элементами $x_{m,\ell}$, где m - номер отсчета по времени задержки (дальности); ℓ - номер приемного канала.

В модели первичной обработке воспроизводятся следующие процессы: оценивание корреляционной матрицы процессов на выходе приемных каналов; вычисление вектора весовых коэффициентов; весовая обработка; вычисление оценки мощности взвешенных внутренних шумов и остатков помех на выходе обработки; сжатие сигнала по дальности (внутрипериодная обработка).

Выходным результатом блока является вектор $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_M)$ отсчетов сигналов на выходе пространственно-временной обработки при максимизации отношения сигнал/помеха+шум в заданном

угловом направлении, нормированный к оценке мощности взвешенных внутренних шумов и остатков внешних помех.

В блоке оценки угловых координат выполняется оценивание угловых координат с использованием метода Ньютона или градиентного метода. Работа блока оценивания угловых координат предполагает многократный вызов (использование) модели первичной обработки сигналов. Результатом являются оценки азимуту и угла места отраженного сигнала.

В блоке статистики и визуализации количественно оценивается эффективность измерения угловых координат цели по азимуту и углу места путем усреднения результатов моделирования по множеству реализаций и вычисления среднеквадратических ошибок измерения (RMSE). Графические выходные данные включают гистограммы угловых ошибок и траектории сходимости, что позволяет интуитивно оценивать поведение системы в условиях изменяющегося SNR и помех.

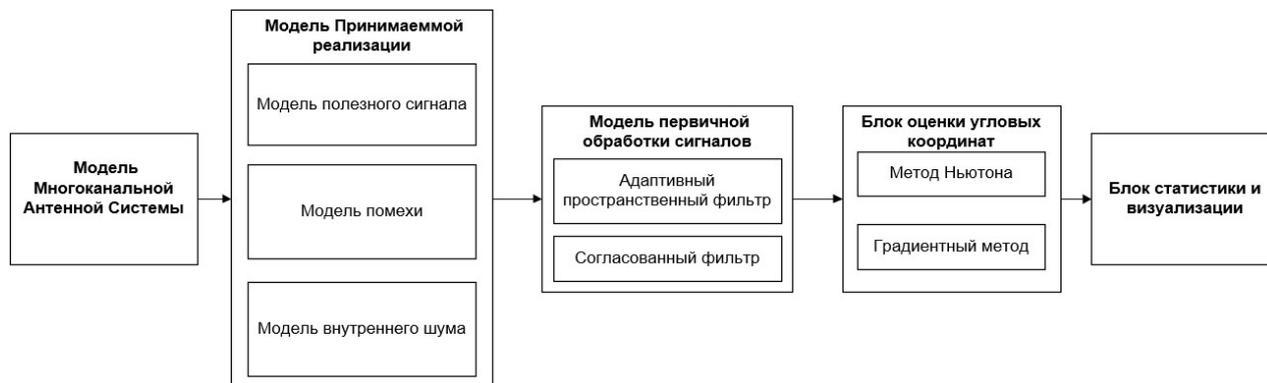


Рисунок 1 - Структурная схема компьютерной модели

Компьютерная модель реализована в системе *MatLab* и имеет удобный пользовательский интерфейс, реализованный с использованием *App Designer*. Вид главной вкладки пользовательского интерфейса на показан на рисунке 2.

На главной вкладке задаются: несущая частота сигнала; геометрия прямоугольной антенной решеткой, расположенной в плоскости yOz . Решетка разделена на подрешетки вдоль осей Oy и Oz , что обеспечивает возможности адаптивного формирования луча при небольшом (порядка 16...32) числе управляемых приемных каналов. По источнику помех задаются его азимут, угол места и мощность на выходе изотропного приемного канала, нормированная к мощности внутренних шумов приемного канала. По отраженному от цели сигналу задается азимут, угол места и мощность источника сигнала на выходе изотропного приемного канала, нормированная к мощности внутренних шумов приемного канала. Фаза отраженного сигнала берется случайной на интервале $0...2\pi$. В качестве зондирующего сигнала рассматривался ЛЧМ-импульс. В нижней части главной вкладки размещены управляющие кнопки для запуска процедур расчета и окна для вывода результатов.

Вид вспомогательных вкладок и иллюстрация состава выводимой информации показаны на рисунках 3,4.

Алгоритмы оценивания угловых координат на основе алгоритма метода Ньютона и градиентного метода

Математически задача оценивания азимута и угла места радиолокационной цели формулируется как [5]

$$\hat{\alpha}, \hat{\rho} = \arg \max_{\alpha, \beta} \frac{|\mathbf{w}(\alpha, \beta) \mathbf{y}|^2}{\mathbf{w}^H(\alpha, \beta) \cdot \hat{\Phi} \cdot \mathbf{w}(\alpha, \beta)}, \quad (1)$$

где $\mathbf{w}(\alpha, \beta) = \hat{\Phi} \mathbf{f}(\alpha, \beta)$ – оптимальный по критерию максимума отношения сигнал / помеха + шум весовой вектор для приема отраженного сигнала с углового направления (α, β) ; $\hat{\Phi}$ – оценка корреляционной матрицы процессов на выходе приемных каналов РЛС; \mathbf{y} – вектор-столбец принимаемой реализации на выходе тракта первичной обработки для некоторого момента времени, соответствующего времени задержки отраженного сигнала; $Z(\alpha, \beta) = \frac{|\mathbf{w}(\alpha, \beta) \mathbf{y}|^2}{\mathbf{w}^H(\alpha, \beta) \cdot \hat{\Phi} \cdot \mathbf{w}(\alpha, \beta)}$ – функция двух переменных для максимизации.

Прямая максимизация функции $Z(\alpha, \beta)$ в радиолокаторе практически невозможна из-за вычислительных затрат. Для прямой максимизации необходимо выполнить расчеты для сетки углов по

азимуту и углу места. Для оценки угловых координат в компьютерной модели реализованы два метода оптимизации.

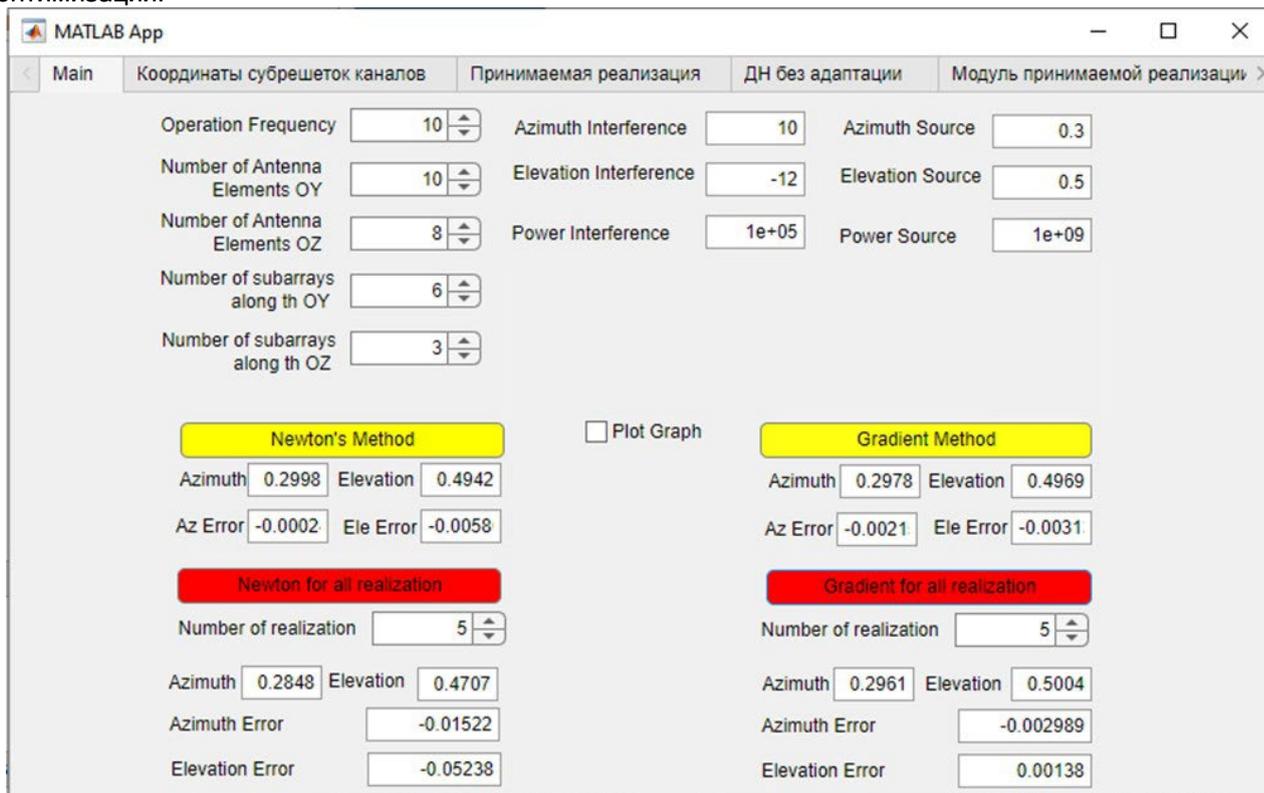
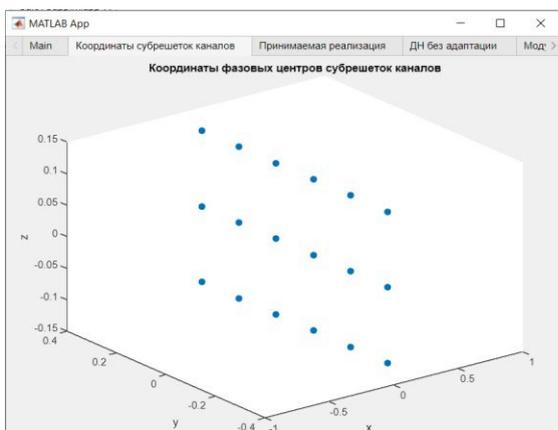
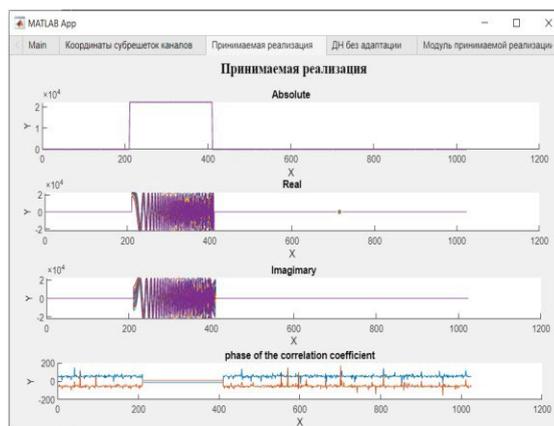


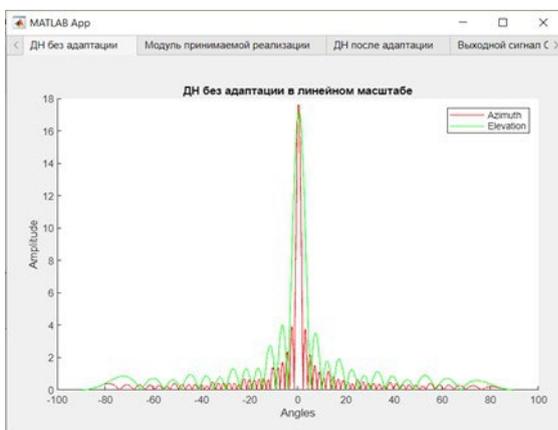
Рисунок 2 - Вид главной вкладки интерфейса компьютерной модели



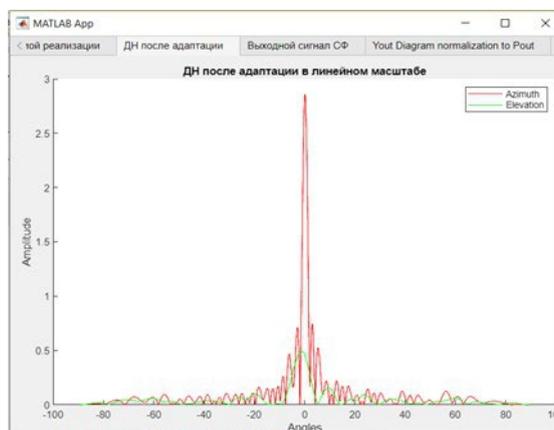
а - Координаты фазовых центров субрешеток каналов



б - Принимаемая реализация

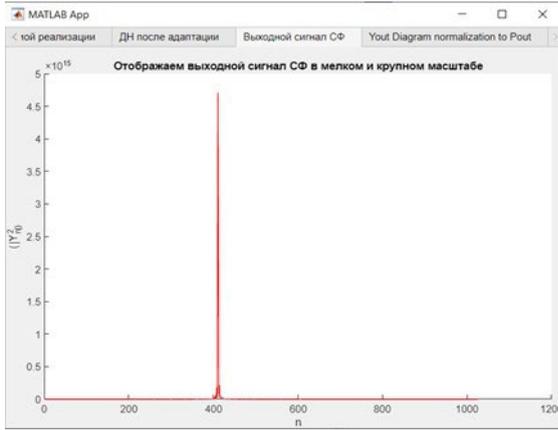


в - ДН антенной решетки по напряжению без адаптации

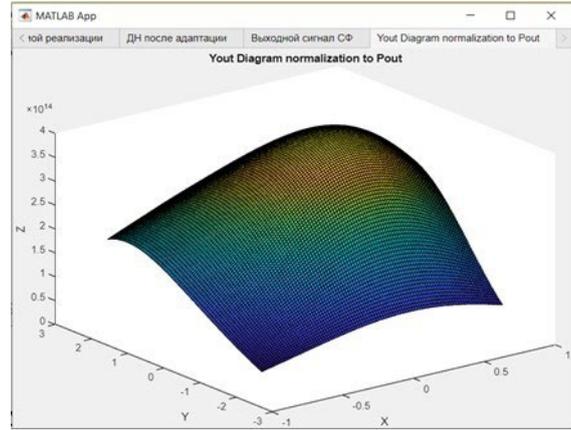


г - ДН антенной решетки после адаптации

Рисунок 3 - Вид вспомогательных вкладок с данными по геометрии решетки и параметрами сигналов



а - Выходной сигнал согласованного фильтра



е - Нормированный выходной сигнал системы обработки на координатах азимут-угол местности

Рисунок 4 - Вид вспомогательных вкладок: с выводом результатов обработки

Метод Ньютона используется для максимизации функции многих переменных и может быть использован для оценки угловых координат (азимута и угла места) в радиолокационных системах с многоканальными приемными решетками. Цель в данном случае состоит в быстром нахождении максимума функции (1) двух переменных, что соответствует наиболее точной оценке угловых координат цели, за минимальное число итераций.

Метод основан на вычислении матрицы вторых производных (МВП). Если максимизируемая функция является квадратичной по переменным азимут и угол места, то с использованием метода Ньютона решение находится за один шаг. Если это условие не выполняется, то для достижения заданной точности может потребоваться несколько шагов.

Выражения для вектора первых производных и матрицы вторых производных в численном виде имеют вид:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}; F_1 = \frac{\Psi_{+1,0} - \Psi_{-1,0}}{2\Delta\alpha}; F_2 = \frac{\Psi_{0,+1} - \Psi_{0,-1}}{2\Delta\beta};$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}; F_{11} = \frac{\Psi_{+1,0} - 2\Psi_{0,0} + \Psi_{-1,0}}{\Delta\alpha}; F_{22} = \frac{\Psi_{0,+1} - 2\Psi_{0,0} + \Psi_{0,-1}}{\Delta\beta};$$

$$F_{12} = F_{21} = \frac{\Psi_{+1,+1} - \Psi_{-1,+1} - \Psi_{+1,-1} + \Psi_{-1,-1}}{4\Delta\alpha\Delta\beta},$$
(2)

где Ψ_{k_1,k_2} - значения функции $Z(\alpha_k, \beta_k)$, вычисляемые в 9-ти направлениях (рисунок 5) относительно заданного опорного направления (α_0, β_0) ; $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ - отклонения направлений наблюдения от центрального по азимуту и углу места, выбираемые как 10% от ширины главного лепестка диаграммы направленности по соответствующей координате.

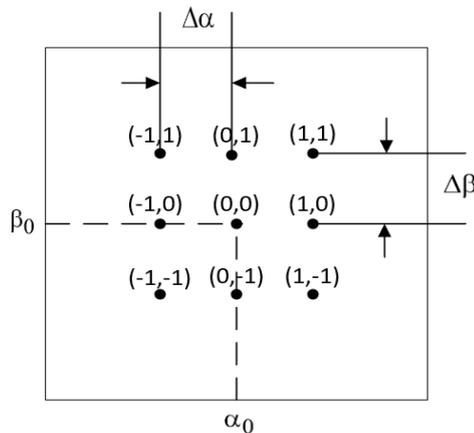


Рисунок 5 - Иллюстрация 9-ти угловых направлений при вычислении матрицы вторых производных

Оптимальная оценка угловых координат для метода Ньютона после первого шага имеет вид

$$\begin{pmatrix} \hat{\alpha}_c \\ \hat{\beta}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_M \\ \beta_M \end{pmatrix} - \mathbf{F}^{-1} \mathbf{f}. \quad (3)$$

Вычисления по методу Ньютона можно повторять многократно, что необходимо, если вид целевой функции заметно отличается от квадратичного.

Метод градиента – это итерационный метод оптимизации, используемый для нахождения максимума (или минимума) функции путем движения в направлении наиболее крутого подъема (или спуска). В данном контексте он применяется для максимизации функции $Z(\alpha, \beta)$.

Получение максимально-правдоподобной оценки проводится по рекурсивному алгоритму:

$$F_1 = \frac{\Psi_{1,0} - \Psi_{-1,0}}{2\mu\Delta\alpha(\Psi_{1,0} + \Psi_{-1,0})}; F_2 = \frac{\Psi_{0,1} - \Psi_{0,-1}}{2\mu\Delta\beta(\Psi_{0,1} - \Psi_{0,-1})} \quad (4)$$

$$\hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{k-1} + F_1 \cdot \gamma \cdot \Delta\alpha; \hat{\beta}_k = \hat{\beta}_{k-1} + F_2 \cdot \gamma \cdot \Delta\beta,$$

где γ – параметр, определяющий скорость сходимости. В зависимости от этого значения этого параметра сходимость достигается за десятки-сотни шагов.

Результаты исследования эффективности методом компьютерного моделирования

При исследовании эффективности принимались следующие исходные данные: радиолокационная система работает на частоте 10 ГГц с прямоугольной антенной решеткой, которая разделена на 6 подрешеток вдоль Оу и 3 подрешетки вдоль Oz, что обеспечивает возможности адаптивного формирования луча; каждая подрешетка состоит из 10 элементов вдоль оси Оу (общий размер решетки по оси Оу 60 элементов или 30λ) и 8 элементов вдоль оси Oz (общий размер решетки по оси Oz 24 элемента или 12λ); ширина главного лепестка антенной решетки по азимуту и углу места при фазировании по нормали к решетке $1,9^\circ$ и $4,8^\circ$

источник помех с мощностью 40 дБ находится на азимуте 10° и угле места минус 12° ;

цель с мощностью отраженного сигнала 60 дБ расположена на азимуте $0,3^\circ$ и угле места $0,5^\circ$.

Такая конфигурация предполагает сценарий, в котором радар должен обнаруживать слабую цель, одновременно подавляя помехи от более слабого источника, используя обработку подрешетки для повышения точности направления и подавления помех.

Метод Ньютона и градиентный метод находились в разных условиях: метод Ньютона был одношаговым; градиентный метод реализовывался рекурсивно до получения значения модуля градиента менее заданной малой величины.

Результаты моделирования в виде ошибок оценивания азимута и угла места для алгоритма Ньютона и градиентного алгоритма приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты оценки направления и среднеквадратичные ошибки

Алгоритм	Математическое ожидание азимута цели, град.	Математическое ожидание угла места цели, град.	Среднеквадратичная ошибка по азимуту, град.	Среднеквадратичная ошибка по углу места, град.	Суммарная среднеквадратичная ошибка по азимуту и углу места, град.
Метод Ньютона	0,28	0,47	0.011	0.027	0.029
Градиентный метод	0,30	0,50	0.002	0.005	0.005

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

для обоих методов помехи эффективно компенсируются, наличие помехи практически не влияет на обнаружение и оценивание угловых координат сигнала;

градиентный метод демонстрирует устойчивую сходимость к истинным значениям азимута и угла места, но требует большого (в среднем, несколько десятков) числа итераций для достижения высокой точности;

метод Ньютона обеспечивает сходимость за один шаг с получением среднеквадратической ошибки угловых координат порядка 1% (при указанных отношениях сигнал/шум) от ширины главного лепестка диаграммы направленности по соответствующей координате; одношаговая сходимость метода Ньютона достигается благодаря расчету матрицы вторых производных по 9-ти точкам; указанной точности вполне достаточно для практических применений;

Результаты подтверждают, что адаптивная пространственная обработка сигналов многоканальной приемной системе и нормировкой результат к оценке мощности взвешенных внутренних шумов и остатков помех с последующим использованием метода Ньютона или градиентного метода для оценивания угловых координат радиолокационной цели обеспечивает требуемую на практике точность в условиях интенсивных помех, воздействующих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенной решетки.

Список использованных источников:

1. Skolnik, M. I. *Radar Handbook*. 3rd ed., McGraw-Hill, 2008. – 610 p.
2. Wirth, W. D. *Radar Techniques Using Array Antennas*. 2nd ed., The Institution of Engineering and Technology (IET), 2013. – 558 p.
3. Monzingo, R. A., Miller, T. W. *Адаптивные Антенные Решетки: Введение в теорию [Adaptive Antenna Arrays: Introduction to Theory]*. М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
4. Fenn, A. J. *Adaptive Antennas and Phased Arrays for Radar and Communications*. Artech House, 2008. – 114 p.
5. Haykin, S. *Adaptive Filter Theory*. 5th ed., Pearson, 2014. – 936 p.
6. Richards, M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. 2nd ed., McGraw-Hill, 2014. – 672 p.

UDC 621.396

ALGORITHMS FOR ESTIMATION OF ANGULAR COORDINATES IN RADAR WITH DIGITAL DIAGRAM FORMATION

Zin Aung, Master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A brief description of mathematical models and algorithms for estimating angular coordinates in radar systems (RS) with digital beamforming is given. The accuracy and efficiency of algorithms for estimating angular coordinates under interference and multipath signal propagation conditions are studied using the mathematical modeling method.

Key words. Radar system, digital beamforming, angular coordinates, estimation algorithms, spatial signal processing, mathematical modeling, direction finding accuracy.