

**ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВСЕНАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ**

Арефьев В.И., Никонова Л.В., Талалаев А.Б.
ЗАО «РТИС ВКО», г. Тверь

Поступила в редакцию 18.02.2016, после переработки 26.02.2016.

Исследованы методы измерения угловых координат воздушных объектов при помощи всенаправленной антенны: фазовые диаграммы направленности всенаправленной антенны, их зависимости от количества вибраторов в антенне, от длины волны несущей частоты, от азимута и угла места прихода сигнала. Предложены амплитудно-фазовые алгоритмы определения угловых координат.

Ключевые слова: всенаправленная антенна, диаграммы направленности, турникетный излучатель, амплитудно-фазовое распределение, фазовый метод измерения координат.

Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 1. С. 53–61.

Введение

В настоящее время измерение азимутальных координат воздушных объектов, как правило, реализуется при помощи вращения приемной антенной системы, либо использования нескольких разнесенных антенных решеток с рефлекторами. Предложенные в работе фазовые методы позволяют получить угловые координаты целей при помощи антенны, всенаправленной в горизонтальной плоскости. Такие антенны можно размещать на не вращающихся опорных мачтах, что значительно уменьшает громоздкость приемной антенной системы и увеличивает время ее эксплуатации.

1. Антенна, всенаправленная в горизонтальной плоскости. Амплитудно-фазовые диаграммы направленности

Рассмотрим передающую антенну, которая имеет в горизонтальной плоскости равномерную амплитудную диаграмму направленности, а фазовая диаграмма линейно зависит от угла прихода сигнала. В [2, стр. 339] она называется «антенной с вращающимся полем» и представляет собой n радиальных проводников, которые расположены в одной плоскости – см. Рис. 1. Проводники запитаны таким образом, что амплитуды токов одинаковы, а фазы меняются пропорционально азимутальному углу так, что за полный обход всех проводников по кругу, итоговый сдвиг фаз получается кратным 2π : $\Delta\varphi n = 2\pi m$, $m \in \mathbb{N}$, $\Delta\varphi$ – сдвиг фаз токов

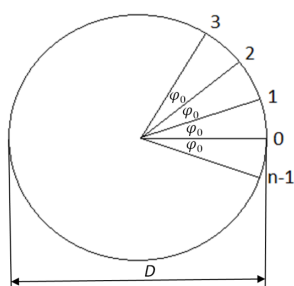


Рис. 1: Всенаправленная антенна

между соседними проводниками. Тем самым достигается всенаправленное излучение в плоскости антенны. Амплитудная диаграмма направленности тем ближе по форме к окружности, чем больше число n радиальных элементов.

Излученное поле будет в общем случае эллиптически поляризованным [2, стр. 340]. Оно имеет две ортогональные составляющие: одна, параллельная плоскости антенны (назовем ее горизонтальной) – E_φ , и другая, перпендикулярная ей – E_θ (см. обозначения на Рис. 2, где xoy – плоскость расположения антенны).

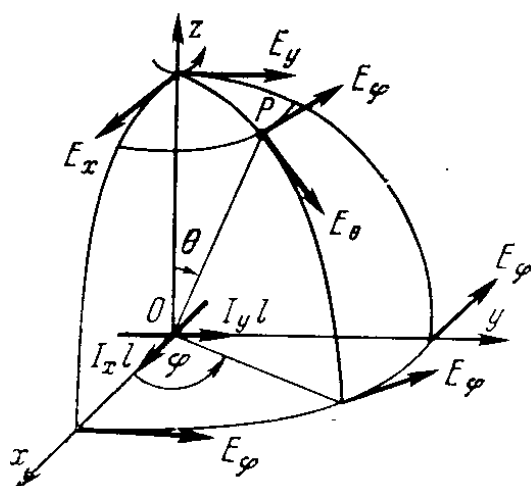


Рис. 2: Составляющие поля всенаправленной антенны

В плоскости расположения антенны составляющая E_θ отсутствует, и поле поляризовано линейно. На оси z обе составляющие равны, и поле имеет круговую поляризацию.

Простейший вариант такого излучателя называется турникетной антенной. Он представляет из себя два ($n = 4$) взаимно перпендикулярных вибратора одинаковой длины, возбуждаемых током со сдвигом фаз в $\pi/2$ ($\Delta\varphi = \pi/2$). Формульные выражения для двух ортогональных компонент поля турникетного излучателя

следующие:

$$\begin{aligned} F_\varepsilon &= \sin(\varepsilon) \cdot \left(\cos(\varphi) \cdot \frac{\cos(k \cdot l \cdot \cos(\varepsilon)) \cdot \cos(\varphi) - \cos(k \cdot l)}{1 - \cos^2(\varepsilon) \cdot \cos^2(\varphi)} + i \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{\cos(k \cdot l \cdot \cos(\varepsilon)) \cdot \cos(\varphi) - \cos(k \cdot l)}{1 - \cos^2(\varepsilon) \cdot \cos^2(\varphi)} \right), \\ F_\varphi &= -\sin(\varphi) \cdot \frac{\cos(k \cdot l \cdot \cos(\varepsilon)) \cdot \cos(\varphi) - \cos(k \cdot l)}{1 - \cos^2(\varepsilon) \cdot \cos^2(\varphi)} + i \cdot \cos(\varphi) \cdot \frac{\cos(k \cdot l \cdot \cos(\varepsilon)) \cdot \cos(\varphi) - \cos(k \cdot l)}{1 - \cos^2(\varepsilon) \cdot \cos^2(\varphi)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где φ – азимутальный угол, ε – угол места ($\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \theta$ в обозначениях Рис. 2), k – волновое число ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$), l – плечо вибратора ($l = D/2$).

F_ε и F_φ в формулах (1) моделируют диаграммы направленности ортогональных компонент вектора напряженности поля турникетного излучателя. Смоделированные амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН) в плоскости антенны (горизонтальной) приведены на Рис. 3. Видим, что амплитудные диаграммы направленности близки к кругу (но для турникетного излучателя такая зависимость сохраняется при $l \leq \frac{\lambda}{4}$, поскольку количество радиальных элементов мало), а фазовые близки к линейным по азимуту.

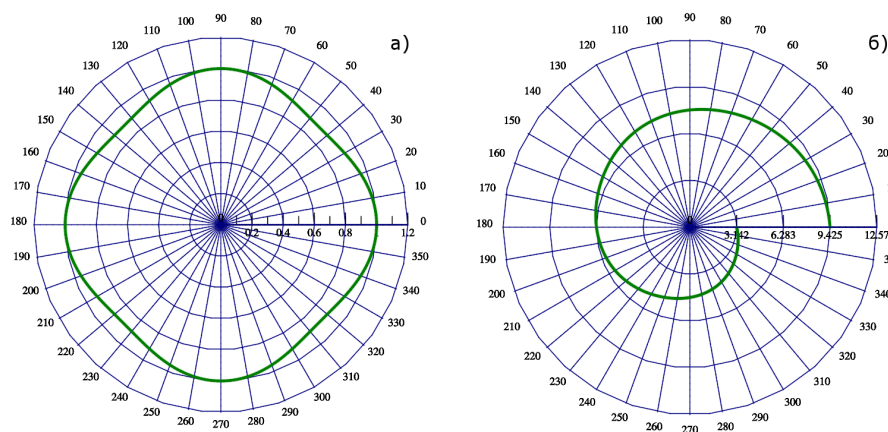


Рис. 3: Амплитудные (а) и фазовые (б) ДН турникетного излучателя при $l = \frac{\lambda}{4}$

Ближайшей аналогией представленных амплитудно-фазовых диаграмм направленности является поле элементарного турникетного излучателя, составленного из двух диполей Герца [5, стр. 45].

Для достижения достаточной равномерности амплитудной диаграммы направленности при сохранении линейности по фазе предлагается использовать некий промежуточный вариант между общим случаем антенны с «вращающимся полем» из n проводников и турникетным излучателем – систему из трех скрещенных по середине вибраторов, что также позволяет применять фазовые методы оценки азимута в достаточно широком диапазоне частот. Диаграммы направленности такой антенны при возбуждении вибраторов равноамплитудным током со сдвигом фазы $\Delta\varphi = 2\pi/3$, при $l = 1,5$ м на частоте 70 МГц, приведены на Рис. 4.

2. Фазовый метод определения азимута воздушного объекта

Учитывая принцип взаимности [3,5] и линейность фазовых диаграмм рассмотренной выше всенаправленной антенны (будь то общий случай, система из трех

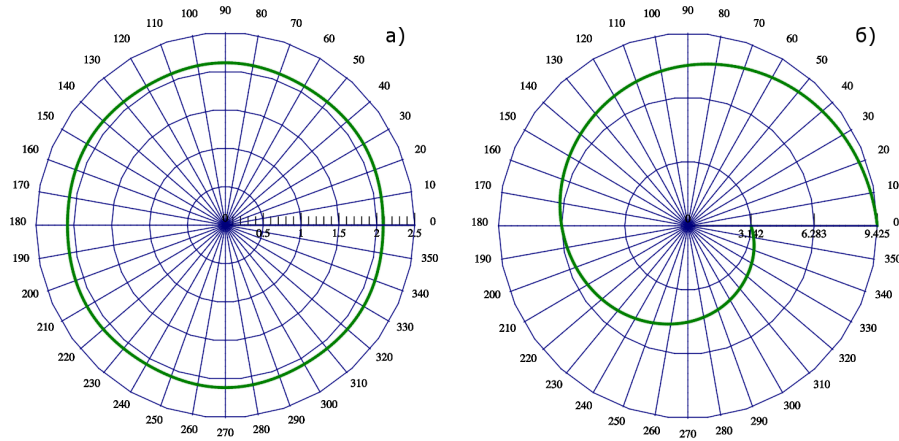


Рис. 4: Амплитудные (а) и фазовые (б) ДН системы из трех скрещенных вибраторов при $l = 1,5$ м и $f = 70$ МГц

скрещенных вибраторов или турникетная антенна) по азимуту, такую антенну можно использовать в качестве приемной.

Рассмотрим предложенную выше систему из трех скрещенных по середине вибраторов. Для определения азимута прихода сигнала, отраженного от воздушного объекта, формируются два функционала, зависящие от комплексной напряженности на трех вибраторах; один назовем суммарным, другой – разностным:

$$\begin{aligned} \dot{U}_S &= \dot{u}_1 + \dot{u}_2 \cdot e^{i\varphi_0} + \dot{u}_3 \cdot e^{2i\varphi_0} = \dot{s}(\lambda, t, \varphi_1) \cdot \dot{F}_S(\lambda, \varphi, \varepsilon), \\ \dot{U}_D &= \dot{u}_1 + \dot{u}_2 \cdot e^{-i\varphi_0} + \dot{u}_3 \cdot e^{-2i\varphi_0} = \dot{s}(\lambda, t, \varphi_1) \cdot \dot{F}_D(\lambda, \varphi, \varepsilon). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\dot{u}_{1,2,3}$ – комплексное напряжение на вибраторах, φ_0 – угол поворота вибраторов относительно друг друга, $\dot{s}(\lambda, t, \varphi_1)$ – комплексный сигнал в точке приема, зависящий от:

- t – времени распространения,
- λ – длины волны несущей частоты,
- φ_1 – начальной фазы сигнала в точке приема;

φ – азимут прихода сигнала, ε – угол места прихода сигнала, $\dot{F}_S(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ и $\dot{F}_D(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ – комплексные суммарные и разностные диаграммы направленности. Функционал $\dot{F}_D(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ соответствует амплитудно-фазовым диаграммам направленности излучателя из трех скрещенных вибраторов (см. графики на Рис. 4). $\dot{F}_S(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ имеет такую же амплитуду, как и $\dot{F}_D(\lambda, \varphi, \varepsilon)$, но его фазовая характеристика линейно возрастает по азимуту.

Для определения азимута φ используются фазовые компоненты суммарных и разностных диаграмм направленности:

$$\frac{\dot{U}_S}{\dot{U}_D} = \frac{\dot{F}_S(\lambda, \varphi, \varepsilon)}{\dot{F}_D(\lambda, \varphi, \varepsilon)}, \quad \varphi \approx \frac{\arg\left(\frac{\dot{U}_S}{\dot{U}_D}\right) + \pi}{2}. \quad (3)$$

Графики зависимости фаз функционалов $\dot{F}_S(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ и $\dot{F}_D(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ приведены на Рис. 5. Их линейность по азимуту φ зависит также от λ и ε , поэтому для применения формулы (3) необходимо проверить соблюдение линейной зависимости на границах используемых диапазонов длин волн и углов места.

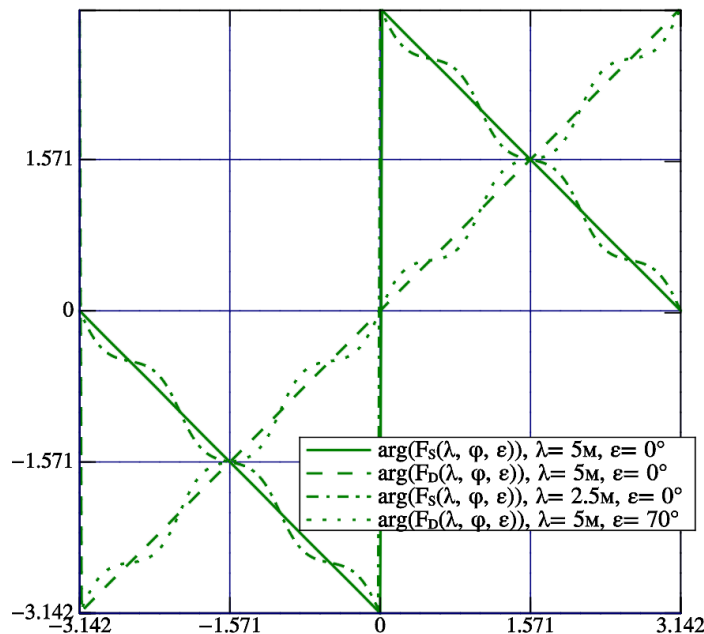


Рис. 5: Фаза функционалов \dot{F}_S и \dot{F}_D при различных значениях λ и ε

Для иллюстрации снова воспользуемся диаграммами направленности элементарного турникетного излучателя, составленного из двух диполей Герца [5, стр. 45]:

$$\dot{U}_{ST} = \dot{s}(\lambda, t, \varphi_1) \cdot A \cdot e^{i \cdot \varphi}, \quad \dot{U}_{DT} = \dot{s}(\lambda, t, \varphi_1) \cdot A \cdot e^{i \cdot (\pi - \varphi)}, \quad \frac{\dot{U}_{ST}}{\dot{U}_{DT}} = e^{i \cdot (2\varphi - \pi)}, \quad (4)$$

где \dot{U}_{ST} и \dot{U}_{DT} – суммарный и разностный функционалы напряженности элементарной турникетной антенны, составленные по аналогии с (2) для двух диполей.

Особенность представленного метода – полученные азимуты находятся в диапазоне $[0, \pi]$, то есть азимутальный угол определяется с неоднозначностью в π . Неоднозначность можно устранить при помощи поочередной смены направления излучения и одновременного анализа направления и мощности принятого сигнала.

Для обеспечения достаточной мощности принимаемого сигнала предлагается использовать одновременно несколько всенаправленных антенн, установленных на одной опорной мачте.

Представленный фазовый метод определения азимута был реализован в эксперименте с обнаружением воздушных объектов разных типов при помощи приемной антенны, размещенной на одной не вращающейся опорной мачте и состоящей из 4 этажей, на каждом из которых находится всенаправленная антенна описанной

выше конструкции – три скрещенных по середине вибратора. Обнаружение проводилось в диапазоне $\lambda \in [4 \text{ м}; 6 \text{ м}]$ при длине плеча вибратора $l = 1 \text{ м}$. Согласно моделированию, при таком соотношении длины волны и размера вибратора фазы функционалов $\dot{F}_S(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ и $\dot{F}_D(\lambda, \varphi, \varepsilon)$ сохраняют линейность (см. Рис. 5) в диапазоне углов $\varepsilon \in [0^\circ; 70^\circ]$, что позволило получить достоверные значения азимутального угла. Среднеквадратичное отклонение полученных азимутальных координат от эталонных (измеренных грс-приемником) составило $2^\circ - 3^\circ$ при минимальном значении сигнал/шум в 18 Дб.

3. Амплитудно-фазовый метод определения угла места воздушного объекта

Задача измерения угла места воздушного объекта заключается в определении угла падения отраженной от объекта волны на вертикальную антенную решетку. Общепринятый метод решения этой задачи предполагает цифровое формирование угломестного «веера» лучей, каждый из которых соответствует значению корреляции принятого сигнала и модельного, рассчитанного для определенного заданного угла места. Искомый угол места определяется по значению максимума корреляции. Но точность этого метода определяется шириной диаграммы направленности парциальных лучей.

Для дальнейшего уточнения результата предлагается использовать метод минимизации невязки принятого и модельного сигнала внутри определенного сектора углов места. Минимизируется сумма квадратов отклонений нормированного амплитудно-фазового распределения на выходе приемных каналов после когерентного накопления от модельного амплитудно-фазового распределения в заданном диапазоне углов места. Экспериментальное амплитудно-фазовое распределение (принятый сигнал) обозначается $\dot{S}_j(d_j, \lambda, \varphi_j, \varepsilon_j)$, где j – порядковый номер вибратора антенны, d_j – наклонная дальность от воздушного объекта до каждого вибратора, φ_j – азимут объекта относительно вибратора, ε_j – угол места объекта относительно вибратора. Модельное амплитудно-фазовое распределение формируется из поля прямой волны и отраженной от Земли. В предположении, что амплитуда поля в точке отражения равна 1, фаза – 0, а расстояние до цели много больше высоты антенны, модельное распределение одного приемного канала антенны выражается следующим образом [4]:

$$\dot{E}_j(d_j, \lambda, \varphi_j, \varepsilon_j) = \dot{F}(\lambda, \varphi_j, \varepsilon_j) \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_j} \cdot (1 + R \cdot e^{-i \cdot \varphi_j \Sigma}).$$

Здесь $\dot{F}(\lambda, \varphi_j, \varepsilon_j)$ – диаграммы направленности вибратора относительно направления $(\varphi_j, \varepsilon_j)$, R – модуль коэффициента отражения с учетом подстилающей поверхности (коэффициента Френеля), $\varphi_j \Sigma = \arg(\dot{R}) + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot h_j \cdot \sin(\varepsilon_j)$, h_j – высота вибратора над Землей.

Для определения угла места решается задача минимизации нормы вектора отклонений модельного амплитудно-фазового распределения от экспериментального:

$$M(\varepsilon) \longrightarrow \min_{\varepsilon}, \quad (5)$$

где $M(\varepsilon) = \sum_{j=1}^N \|\dot{E}_j - \dot{S}_j\|$, N – количество вибраторов в антенне, ε – вектор значений угла места объекта относительно всех вибраторов. Вектор $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)$ служит для определения искомого угла места:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \varepsilon_j}{N}. \quad (6)$$

Предложенный метод был использован для расчета угла места по модельным данным (данным цифрового имитатора сигнала, отраженного от движущегося воздушного объекта) и показал среднеквадратичное отклонение полученных координат от эталонных (смоделированных имитатором) $\sigma = 1.5^\circ - 2^\circ$.

Заключение

Представленные в статье методы были реализованы при оценке угловых координат различных типов воздушных объектов по данным цифрового имитатора, а также в ходе экспериментов с использованием антенны, описанной в п. 2 статьи, и обеспечили точности, достаточные для дальнейшего их применения в радиолокационных станциях метрового диапазона длин волн.

Список литературы

- [1] Ефимов А.А., Коннов А.Л., Король О.В., Кучеров Ю.С., Назаренко И.П., Талалаев А.Б., Шустов Э.И. Способ радиолокационного определения координат целей. Патент РФ № 2127437, 31.03.1998.
- [2] Мейнке Х., Гундлах Ф.В. Радиотехнический справочник. Том 1. М.: Государственное энергетическое издательство, 1960.
- [3] Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. М.: Радио и связь, 1989.
- [4] Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983.
- [5] Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: «Энергия», 1975.

Библиографическая ссылка

Арефьев В.И., Никонова Л.В., Талалаев А.Б. Фазовые методы измерения угловых координат воздушных объектов с использованием всенаправленной антенны // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 1. С. 53–61.

Сведения об авторах**1. Арефьев Владимир Игоревич**

заместитель начальника отдела ЗАО «Радиотехнические и Информационные Системы воздушно-космической обороны».

170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, к. 1, ЗАО «РТИС ВКО».

2. Никонова Людмила Владимировна

старший научный сотрудник ЗАО «Радиотехнические и Информационные Системы воздушно-космической обороны».

170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, к. 1, ЗАО «РТИС ВКО».

3. Талалаев Александр Борисович

генеральный директор ЗАО «Радиотехнические и Информационные Системы воздушно-космической обороны».

170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, к. 1, ЗАО «РТИС ВКО».

PHASE METHODS OF AIRCRAFT ANGLE COORDINATES ESTIMATION USING OMNIDIRECTIONAL ANTENNA

Arefiev Vladimir Igorevich

Deputy Head of department, CJSC "RTIS VKO"
Russia, 170041, Tver, 89 corp. 1 Zinaidy Konopliannikovoy str.

Nikonova Liudmila Vladimirovna

Senior Researcher, CJSC "RTIS VKO"
Russia, 170041, Tver, 89 corp. 1 Zinaidy Konopliannikovoy str.

Talalaev Aleksandr Borisovich

CEO, CJSC "RTIS VKO"
Russia, 170041, Tver, 89 corp. 1 Zinaidy Konopliannikovoy str.

Received 18.01.2016, revised 26.02.2016.

Methods of aircraft angle coordinates estimation using omnidirectional antenna are investigated, including phase radiation patterns of omnidirectional antenna, their dependence on dipole quantity, carrier frequency wavelength, azimuth and elevation of received signal. Amplitude-phase algorithms of angle coordinates determination are proposed.

Keywords: omnidirectional antenna, radiation pattern, tourniquet radiator, amplitude-phase distribution, phase method of coordinates estimation.

Bibliographic citation

Arefiev V.G., Nikonova L.V., Talalaev A.B. Phase methods of aircraft angle coordinates estimation using omnidirectional antenna. *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya Matematika* [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics], 2016, no. 1, pp. 53–61. (in Russian)

References

- [1] Efimov A.A., Konnov A.L., Korol' O.V., Kucherov Yu.S., Nazarenko I.P., Talalaev A.B., Shustov E.I. *Sposob Radiolokatsionnogo Opredeleniya Koordinat Tselei* [A Radar Method of Determining the Target Coordinates]. Patent RF No 2127437, 31.03.1998.
- [2] Meinke Kh., Gundlakh F.V. *Radiotekhnicheskii Spravochnik* [Radio Engineering Handbook]. Vol. 1. State Energy Publishing, Moscow, 1960.
- [3] Kocherzhevskii G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. *Antenno-fidernye Ustroistva* [Antenna-feeder Devices]. "Radio i svyaz" Publ., Moscow, 1989.
- [4] Finkelshtein M.I. *Osnovy Radiolokatsii* [Radiolocation Basics]. "Radio i svyaz", Moscow, 1983.
- [5] Markov G.T., Sazonov D.M. *Antenny* [Antennas]. "Energiya" Publ., Moscow, 1975.