

Применение компьютерного моделирования в задаче определения направленных свойств антенн радиоэлектронного средства, участвующего в конфликтном взаимодействии

А. С. Мазин, email: mazinant@rambler.ru

ВУНЦ ВВС ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

***Аннотация.** С использованием пакета Mathcad определены требования к направленным свойствам неподвижной антенны наземного радиоэлектронного средства, обеспечивающих воздействие главным лепестком его диаграммы направленности на бортовое радиоэлектронное средство, носитель которого выполняет полет с ненулевыми углами поворота*

***Ключевые слова:** радиоэлектронное средство, диаграмма направленности антенны, антагонистический конфликт, беспилотный летательный аппарат, углы поворота летательного аппарата*

Введение

Среди большого числа задач, относящихся к оценке качества функционирования современных радиоэлектронных средств (РЭС), в настоящее время к приоритетным относятся задачи конфликтного взаимодействия РЭС извлечения информации и РЭС, препятствующих им [1].

Рассмотрим пример антагонистического конфликта двух РЭС, отражающих собственно процесс столкновения интересов противоборствующих сторон на информационном уровне.

Так, для получения информации о наземных объектах (координаты, размеры, внешний вид и т.п.) используются специальные бортовые приемо-передающие РЭС (радиолокационные станции), размещенные на самолетах [2]. Их задача заключается в направленном излучении электромагнитных волн, которые в результате отражения от наземных объектов поступают на вход приемного устройства бортовой РЭС, где подвергаются обработке. Отраженный сигнал, в данном случае, является носителем информации о наземном объекте.

В целях препятствия получению информации о наземных объектах применяются специальные наземные РЭС, оказывающих своим излучением мешающее воздействие на бортовые РЭС [3]. Так, при ориентировании главного луча диаграммы направленности антенны

(ДНА) наземного РЭС на антенну бортового РЭС, на вход приемника бортового РЭС поступают два сигнала: отраженный от наземного объекта и сигнал от наземного РЭС.

Если носитель бортового РЭС выполняет полет со скоростью, многократно превышающей скорость ветра (например, самолет), он менее подвержен траекторным нестабильностям. В силу того, что в рассматриваемом случае бортовое РЭС жестко прикреплено к фюзеляжу носителя, ось главного лепестка его ДНА на протяжении полета перпендикулярна вектору скорости носителя (рисунок 1,а). В таком случае задача наземного РЭС может быть выполнена при использовании узконаправленных антенн, что обеспечивает эффективное использование энергии излучения.

Однако если скорость носителя бортового РЭС сопоставима или несущественно превышает скорость ветра, полет такого носителя (например, малого беспилотного летательного аппарата (БпЛА)) характеризуется ненулевыми значениями углов поворота: крена, тангажа, рыскания [4, 5]. Следовательно, ДНА бортового РЭС также смещается в пространстве на угол поворота (рисунок 1,б). В таком случае возможна ситуация, когда бортовое РЭС в течение некоторого времени будет обращена к наземному объекту главным лепестком своей ДНА и, в то же время, находится вне главного лепестка ДНА наземного РЭС, что для крайнего в рамках антагонистического конфликта недопустимо.

В такой ситуации необходимо обеспечить нахождение бортового РЭС в пределах главного лепестка ДНА наземного РЭС при ненулевых значениях углов поворота ее носителя.

Представляется два способа решения:

Оснащение наземного РЭС средством определения координат носителя бортовой РЭС и поворотным устройством, обеспечивающего ориентацию главного лепестка ДНА наземного РЭС в направлении на бортовое РЭС. Достоинством такого подхода является возможность использования узконаправленной антенны, что обеспечивает высокую эффективность использования энергии излучения наземного РЭС. Однако реализация такого РЭС связана с техническими сложностями и высокими материальными затратами.

Обоснование требований к направленным свойствам неподвижной антенны наземного РЭС, обеспечивающих воздействие на бортовое РЭС главным лепестком своей ДНА в пределах возможных углов поворота ее носителя. Простота технической реализации и отсутствие необходимости определения положения бортового РЭС в пространстве являются очевидными достоинствами такого подхода.

Исходя из вышесказанного, целью работы является разработка методики обоснования требований к направленным свойствам неподвижной антенны наземного РЭС, обеспечивающих воздействие главным лепестком его ДНА на бортовое РЭС, носитель которого выполняет полет с ненулевыми углами поворота.

Содержание методики обоснования требований к направленным свойствам неподвижной антенны наземного РЭС

Обоснование требований к направленным свойствам антенны наземного РЭС, заключается в учете зависимости уровня излученного им сигнала на входе приемника бортового РЭС от угла рассогласования главных лепестков ДНА наземного и бортового РЭС.

С этой целью посредством компьютерного моделирования исследовано влияние угла рассогласования между осями главных лепестков ДНА наземного (рисунок 2) и бортового РЭС (рисунок 3) в заданных пределах углов рыскания ψ , тангажа ν и крена γ ее носителя на отношение уровней мощности сигналов наземного РЭС P_p^{BX} и отраженных от наземного объекта сигналов $P_{об}^{BX}$ на входе приемника бортового РЭС. Значения наклонных дальностей при моделировании составили $r_{p0} = 1650$ м и $r_{об0} = 2000$ м (рисунок 1,б). Высота полета БПЛА $h = 1000$ м.

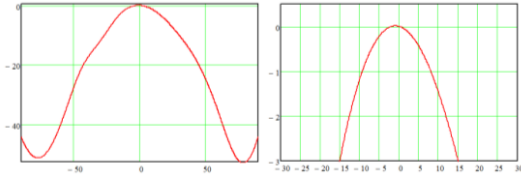
На первом этапе получены модели ДНА наземного и бортового РЭС в азимутальной и угломестной плоскостях (рисунки 2 и 3).

На втором этапе проведено исследование зависимости уровней P_p^{BX} и $P_{об}^{BX}$ при различных значениях угла рыскания ψ согласно выражений (1) и (2), угла тангажа ν – (3) и (4); угла крена γ – (5) и (6):

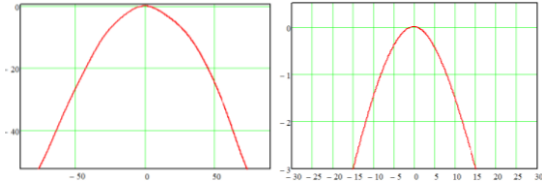
$$P_p^{BX}(\beta_{б\lambda a}) = \frac{1}{r_p^4(\beta_{б\lambda a})} f_p^2(\beta_p(\beta_{б\lambda a})) f_{бр}^2(\beta_{бр}(\beta_{б\lambda a})); \quad (1)$$

$$P_{об}^{BX}(\beta_{б\lambda a}) = \frac{1}{r_{об}^4(\beta_{б\lambda a})} f_{бр}^2(\beta_{об}(\beta_{б\lambda a})) \quad (2)$$

где $r_p(\beta_{б\lambda a}) = \sqrt{r_{см}^2(\beta_{б\lambda a}) + r_{p0}^2}$; $r_{об}(\beta_{б\lambda a}) = \sqrt{r_{см}^2(\beta_{б\lambda a}) + r_{об0}^2}$; $r_{см}(\beta_{б\lambda a}) = \text{tg}(\beta_{б\lambda a}) \times r_{об0}$ – расстояние между осью наземный объект-наземное РЭС и положением БПЛА на маршруте полета при $\beta_{б\lambda a}$ (рисунок 3.6); $f_p^2(\beta)$, $f_{бр}^2(\beta)$ – нормированные ДНА (по мощности) наземного и бортового РЭС



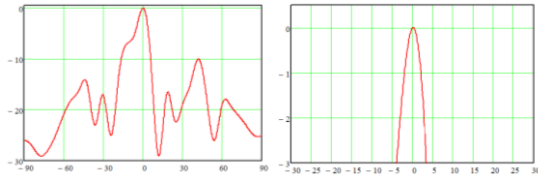
а



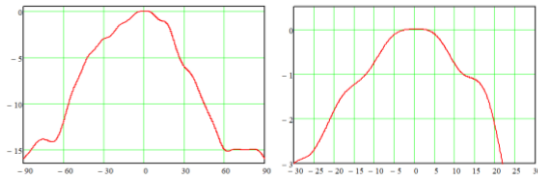
б

а - в азимутальной плоскости $\theta_{\beta} = 30^{\circ}$; б - в угломестной плоскости $\theta_{\varepsilon} = 30^{\circ}$

Рис. 2. Модели ДНА наземного РЭС



а



б

а - в азимутальной плоскости $\theta_{\beta}^{\text{бр}} = 8^{\circ}$; б - в угломестной плоскости $\theta_{\varepsilon}^{\text{бр}} = 50^{\circ}$

Рис. 3. Модели ДНА бортового РЭС

соответственно; $\beta_p(\beta_{\text{бла}}) = \arctg(r_{\text{см}}(\beta_{\text{бла}})/r_{\text{p0}})$ – азимутальный угол у наземного РЭС между осью главного лепестка ДНА и направлением на БПЛА; $\beta_{\text{бр}}(\beta_{\text{бла}}) = |\beta_p(\beta_{\text{бла}}) - \psi|$ – азимутальный угол у БПЛА между осью главного лепестка ДНА бортового РЭС и направлением на наземное РЭС; $\beta_{\text{об}}(\beta_{\text{бла}}) = |\beta_{\text{бла}} - \psi|$ – азимутальный угол у БПЛА между осью главного лепестка ДНА бортового РЭС и направлением на наземный объект;

$$P_p^{\text{вх}}(\beta_{\text{бла}}) = \frac{1}{r_p^4(\beta_{\text{бла}})} f_p^2(\beta_p(\beta_{\text{бла}})) f_{\text{бр}}^2(\beta_{\text{рлс}}^v(\beta_{\text{бла}})); \quad (3)$$

$$P_{\text{об}}^{\text{вх}}(\beta_{\text{бла}}) = \frac{1}{r_{\text{об}}^4(\beta_{\text{бла}})} f_{\text{бр}}^2(\beta_{\text{об}}^v(\beta_{\text{бла}})) \quad (4)$$

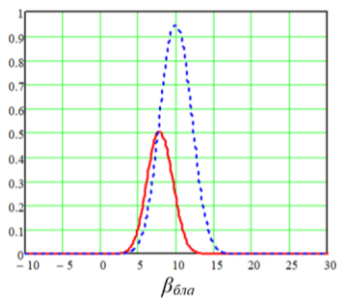
где $\beta_{\text{бр}}^v(\beta_{\text{бла}}) = |\beta_p(\beta_{\text{бла}}) + \beta_v|$; $\beta_{\text{об}}^v(\beta_{\text{бла}}) = |\beta_{\text{бла}} + \beta_v|$; $\beta_v = \arctg(d_{\text{см}}/r_{\text{об0}})$ – азимутальный угол смещения нижнего края ДНА бортового РЭС от вертикального положения при v ; $d_{\text{см}} = \text{tg}(v) \times h$ – расстояние между проекциями на земную поверхность положения БПЛА и нижнего края ДНА бортового РЭС при v ;

$$P_p^{\text{вх}}(\gamma) = \frac{1}{r_{\text{пн}}^4} f_p^2(\varepsilon_p) f_{\text{бр}}^2(\varepsilon_{\text{бр}}(\gamma)); \quad (5)$$

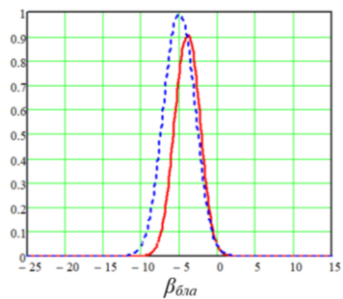
$$P_{\text{об}}^{\text{вх}}(\gamma) = \frac{1}{r_{\text{обн}}^4} f_{\text{бр}}^2(\varepsilon_{\text{об}}(\gamma)) \quad (6)$$

где $r_{\text{пн}} = \sqrt{h^2 + r_{\text{p0}}^2}$, $r_{\text{обн}} = \sqrt{h^2 + r_{\text{об0}}^2}$ – наклонные дальности от БПЛА до наземного РЭС и наземного объекта соответственно; $\varepsilon_p = \arctg(h/r_{\text{p0}})$ – угол места БПЛА относительно наземного РЭС, $\varepsilon_{\text{бр}}(\gamma) = \varepsilon_p - \gamma$ – угол между осью главного лепестка ДНА бортового РЭС и направлением на наземное РЭС в зависимости от значения угла γ ; $\varepsilon_{\text{об}}(\gamma) = \varepsilon_{\text{бла}} - \gamma$ – угол между осью главного лепестка ДНА бортового РЭС и направлением на наземный объект в зависимости от значения угла γ ; $\varepsilon_{\text{бла}} = \arctg(h/r_{\text{об0}})$ – угол места БПЛА относительно наземного объекта.

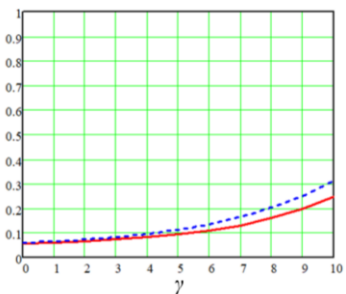
Результаты моделирования представлены на рисунке 4. Сплошной красной линией обозначен уровень $P_p^{\text{вх}}$, пунктирной синей линией – $P_{\text{об}}^{\text{вх}}$.



а



б



в

а – угол рыскания $\psi = 10^\circ$; *б* – угол тангажа $\nu = 10^\circ$; *в* – угол крена $\gamma = 0 \dots 10^\circ$

Рис. 4. Зависимость уровней P_p^{BX} (сплошная линия) и $P_{об}^{BX}$ (пунктирная линия) на входе приемника бортового РЭС от углов поворота БПЛА

Как показано на рисунке 4,а,б, ненулевые значения углов ψ и ν приводят к смещению момента максимального уровня $P_{об}^{БХ}$ в сторону от $\beta_{бла} = 0^\circ$ ($\beta_{бла} = 9,8^\circ$ и $\beta_{бла} = -4,9^\circ$ соответственно). Как следствие, в момент максимума $P_{об}^{БХ}$ уровень $P_p^{БХ}$ оказывается ниже первого. В силу широкой ДНА бортового РЭС $\theta_\varepsilon^{\delta p}$, при изменении угла γ уровни $P_p^{БХ}$ и $P_{об}^{БХ}$ практически совпадают (рисунок 4,в).

Из результатов моделирования следует, что в отличие от угла ψ , углы γ и ν не оказывают существенного влияния на $P_p^{БХ}$ и $P_{об}^{БХ}$ на входе приемника бортового РЭС.

На третьем этапе определено значение угла ψ , при котором ось главного лепестка ДНА бортового РЭС проходит через наземный объект, а малый БПЛА находится в пределах главного лепестка ДНА наземного РЭС θ_β

$$\psi(\theta_\beta) = \arccos \left\{ \frac{r_{об0}^2 + r_{об}(\theta_\beta)^2 - r_{см}^2(\theta_\beta)^2}{2r_{об0}r_{об}(\theta_\beta)} \right\} \quad (7)$$

где $r_{об}(\theta_\beta) = \sqrt{r_{об0}^2 + r_{см}(\theta_\beta)^2}$ – расстояние между БПЛА и наземным объектом; $r_{см}(\theta_\beta) = \frac{r_{п0} \sin(0.5\theta_\beta)}{\sin(\pi/2 - 0.5\theta_\beta)}$ – расстояние смещения БПЛА

по маршруту полета от точки траверза на наземный объект.

Так, при $\psi \leq 15^\circ$, $r_{об0} = 2000$ м и $r_{п0} = 1650$ м воздействие на малый БПЛА с бортовым РЭС главным лепестком ДНА наземного РЭС, ось которой совпадает с осью наземный объект-наземное РЭС, обеспечивается при $\theta_\beta \geq 36^\circ$.

Заключение

Таким образом, в результате использования разработанной методики и пакета Mathcad сформулированы требования к направленным свойствам неподвижной антенны наземного РЭС, обеспечивающим нахождение в пределах главного лепестка диаграммы направленности его антенны бортового РЭС, носитель которого выполняет полет с ненулевыми углами поворота.

В целях снижения эффективности применения бортового РЭС, направлением дальнейших исследований может быть определение зависимости уменьшения $P_{об}^{вх} / P_p^{вх}$ на входе приемника бортовой РЭС от угла рассогласования между осями главных лепестков ДНА наземного и бортового РЭС.

Разработанная методика имеет прикладное значение и может использоваться при проектировании РЭС.

Список литературы

1. Владимиров, В.И. Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели / В.И. Владимиров, В.П. Лихачев, В.М. Шляхин – М.: Радиотехника, 2004. 384 с.
2. Антонов, И.К. Воздушная разведка Автоматизированное дешифрирование радиолокационных изображений. Монография / И.К. Антонов, А.Н. Детков, Д.А. Ницак и др.; под ред. И.К. Антонова – М.: Радиотехника, 2021. 296 с.
3. Куприянов, А.И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А.И. Куприянов, Л.Н. Шустов – М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.
4. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с.
5. Купряшкин, И.Ф. Малогабаритные многофункциональные радиолокационные станции с непрерывным частотно-модулированным излучением: монография / И.Ф. Купряшкин, В.П. Лихачев, Л.Б. Рязанцев – М.: Радиотехника, 2020. 276 с.