Оценка возможности вывода самолета на аэродром посадки при уменьшении габаритов антенны приводной радиостанции

Assessing the Possibility of Guiding the Aircraft to its Landing Airfield with Smaller Size Antenna of Nondirectional Radio Beacon

Ломакова / Lomakova A.
Анастасия Сергеевна
(aslom24@yandex.ru)
ПАО «Интелтех»,
инженер.
г. Санкт-Петербург

Савенкова / Savenkova Y.
Юлия Владимировна
(poli-the@list.ru)
ПАО «Интелтех»,
инженер.
г. Санкт-Петербург

Русин / Rusin S.
Сергей Васильевич
(rusin_spb@mail.ru)
кандидат технических наук.
ПАО «Интелтех»,
заместитель начальника отдела.
г. Санкт-Петербург

Шевченко / Shevchenko V.
Василий Васильевич
(vasily.shevchenko2014@yandex.ru)
кандидат военных наук.
ПАО «Интелтех»,
начальник лаборатории.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: габариты – dimensions; добротность – quality; полоса согласования – match strip; КПД – efficiency.

В статье анализируется влияние габаритов антенны приводной радиостанции на возможности вывода самолета на аэродром посадки в условиях естественных помех на морских и сухопутных трассах. Сделан вывод о возможности и целесообразности миниатюризации антенны приводной радиостанции авианесущего корабля.

The paper analyzes the effect of a nondirectional radio beacon antenna dimensions on the possibility to guide an aircraft to its landing airfield under the conditions of natural interference on land and marine routes. The conclusion is drawn on the possibility and advisability of miniaturizing the nondirectional radio beacon antenna of an aircraft carrier.

Приводная радиостанция нефтяной платформы или авианесущего корабля традиционно оборудуется Т-образной антенной или антенной «Наклонный луч». Для поддержки этих антенн используются две или одна мачта, соответственно, в качестве опоры. Обе антенны имеют большие габариты и ухудшают радиолокационную заметность корабля. На кораблях, построенных по технологии «Стелс», установка подобных антенн невозможна. Менее эффективная антенна «Кольцо» может быть размещена на корме с внешней стороны борта. Плоское полотно антенны «Кольцо» расположено горизонтально и менее заметно для радиолокационных средств. Но из-за низкого расположения антенны над водой резко сокращается расстояние прямой видимости между кораблём и летательным аппаратом и, кроме того, антенна подвержена обледенению и непосредственному воздействию морской воды. Размещение такой антенны на уровне палубных надстроек невозможно, так как полотно антенны окажет экранирующее действие на другие радиотехнические системы. Альтернативой этим антеннам могла бы стать малогабаритная конформная антенна, интегрированная в конструкцию корабля, или, по крайней мере, органично вписанная в профиль корабля и удовлетворяющая требованиям технологии «Стелс».

При уменьшении габаритов антенны уменьшается полоса согласования с передатчиком. Увеличить полосу согласования можно за счет уменьшения КПД антенны. А уменьшение КПД антенны уменьшает дальность действия приводной радиостанции. Три важных параметра антенны: габариты, полоса согласования и КПД тесно связаны, улучшение одного из этих параметров может быть достигнуто за счет ухудшения двух других. При проектировании малогабаритной антенны необходимо предварительно оценить, можно ли в заданных габаритах достичь удовлетворительных параметров антенны. Авторами выполнен анализ влияния габаритов антенны приводной радиостанции на возможности вывода самолета на аэродром посадки в условиях естественных помех на неоднородных трассах с преобладанием морского или сухопутного участка земной поверхности. И сделана оценка целесообраз-

ности использования малогабаритной антенны в составе приводной радиостанции.

Приводная радиостанция мощностью $P_1 = 400$ Вт является элементом радионавигационного комплекса, предназначенного для вывода самолета на аэродром посадки, обеспечения предпосадочного маневра и выполнения захода на посадку. Кроме приводной радиостанции в состав комплекса входит бортовой автоматический радиокомпас, который находится на борту летательного аппарата. Радионавигационный комплекс должен обеспечивать полеты по трассам на высоте 1 км на дальностях 150 км. Диапазон рабочих частот: 190 ... 1750 кГц. Режим работы: телефонный, незатухающие колебания. Ширина полосы приёмника радиокомпаса составляет около 0,6 кГц, тогда как сигнал приводной радиостанции занимает полосу частот около 2 кГц. Мощность сигнала (P_2) на входе приёмника должна быть в 10 раз больше мощности шума.

Будем полагать, что для размещения антенны приводной радиостанции на корабле предоставлено небольшое место размером 0,5x2,2x3,4 м, расположенное на высоте 4 м от морской поверхности. Следует рассчитать предельно достижимые параметры передающей антенны заданного объёма и оценить возможности антенны по обеспечению требуемых характеристик радионавигационного комплекса.

Также предусмотрим, что на трассе корабль – летательный аппарат имеется два разнородных участка: сухопутный и морской. Один из этих участков может быть значительно больше другого. Почва на сухопутном участке может быть различной влажности: от очень сухой до очень влажной, а вода на морском участке может быть слабой или средней солёности, а также может быть покрыта сплошным льдом.

При нормальной рефракции самолёт на дальности 150 км и высоте 1 км будет находиться в зоне полутени. Поэтому множитель ослабления вычислен по формуле Фока [1]:

$$F = 2\sqrt{\pi x}\left|\sum_{s=1}^{\infty}\frac{e^{ixt_s}}{t_s+q^2}\cdot\frac{h_2(t_s+y_1)}{h_2(t_s)}\cdot\frac{h_2(t_s+y_2)}{h_2(t_s)}\right|, \quad (1)$$

где $x = \frac{r}{L}$ – относительное расстояние,

$y_1 = \frac{h_1}{H}$, $y_2 = \frac{h_2}{H}$ – относительные высоты антенн,

$L = \left(\frac{\lambda a^2}{\pi}\right)^{1/3}$, *м*, – масштаб расстояний,

$H = \frac{1}{2}\left(\frac{a\lambda^2}{\pi^2}\right)^{1/3}$, *м* – масштаб высот,

$q = i\sqrt[3]{\frac{\pi a}{\lambda}}\cdot\frac{1}{\sqrt{\varepsilon - i60\lambda\sigma}}$ – параметр, учитывающий полупроводящие свойства поверхности Земли,

$h_2(t) = \sqrt{\frac{\pi}{3}}\cdot e^{-i\frac{2\pi}{3}}t^{1/2}H_{1/3}^{(2)}\left[\frac{2}{3}t^{3/2}\right]$ – функция Эйри, выраженная через функцию Ханкеля второго рода порядка 1/3,

t_s – корни уравнения $h_2'(t) - qh_2(t) = 0$.

В диапазоне 190 ... 1750 кГц достаточно ограничиться пятью членами ряда (1) [2].

Напряженность поля естественных и промышленных помех на крайних частотах диапазона в полосе приёма найдена по графикам, в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.372-10 (10/2009) «Радиошум» [3], а мощность шума на входе приёмника рассчитана с учетом КНД ($D_2 = 3$) антенны авиационного радиокомпаса [4].

Антенна приводной радиостанции – это ненаправленная или слабонаправленная антенна ($D_1 \approx 1$). Из уравнения радиопередачи (2) [4] можно найти минимально допустимый КПД (η_1) передающего антенно-фидерного тракта, при котором будет обеспечиваться 10-кратное превышение мощности сигнала над мощностью помех:

$$P_2 = P_1 D_1 D_2 \eta_1 \eta_2 \zeta_c \zeta_п \left(\frac{\lambda F}{4\pi r}\right)^2, \quad (2)$$

где $\zeta_c, \zeta_п \le 1$ – коэффициенты согласования по сопротивлению передающей антенны с линией передачи и по поляризации приёмной антенны с принимаемым сигналом,

η_2 – КПД приёмного антенного тракта,

r – расстояние между корреспондентами.

По найденной величине минимально допустимого КПД можно найти полосу согласования антенны, помещенной в отведенный объём.

Добротность идеальной (без потерь) антенны вписанной в сферу радиуса «а» определяется выражением [5]:

$$Q_0 = \left[\frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka}\right], \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Известно, также, что добротность антенны без потерь:

$$Q_0 = \frac{X}{2R_\Sigma}, \quad (4)$$

где X – реактивная часть импеданса,

R_Σ – сопротивление излучения.

Двойка в знаменателе введена для учета трансформированного к антенне выходного сопротивления передатчика (по условию согласования).

Добротность антенны с потерями, равна:

$$Q = \frac{X}{2(R_П + R_\Sigma)}, \quad (5)$$

где $R_П$ – сопротивление потерь.

Известно также, что КПД антенны:

$$КПД = \frac{R_\Sigma}{(R_П + R_\Sigma)}. \quad (6)$$

Таблица 1

Полоса согласования в условиях невысокого уровня помех (днём)

Среда	f1 = 190 кГц		f2 = 1750 кГц	
	η_{min}	$2\Delta f$	η_{min}	$2\Delta f$
Морская вода слабой солености	$5.08 \cdot 10^{-6}$	$2\Delta f > 2$ кГц	$8.94 \cdot 10^{-8}$	$2\Delta f > 2$ кГц
Влажная почва	$1.56 \cdot 10^{-5}$	$2\Delta f > 2$ кГц	$9.01 \cdot 10^{-5}$	$2\Delta f > 2$ кГц
Почва средней влажности	$1.67 \cdot 10^{-4}$	$2\Delta f > 2$ кГц	$3.33 \cdot 10^{-3}$	$2\Delta f > 2$ кГц
Сухая почва	$2.92 \cdot 10^{-3}$	34.041	0.019	$2\Delta f > 2$ кГц

Таблица 2

Полоса согласования в условиях высокого уровня помех (ночью)

Среда	f1 = 190 кГц		f2 = 1750 кГц	
	η_{min}	$2\Delta f$	η_{min}	$2\Delta f$
Морская вода слабой солености	$5.63 \cdot 10^{-3}$	17.66	$5.59 \cdot 10^{-5}$	$2\Delta f > 2$ кГц
Влажная почва	0.017	5.75	0.056	$2\Delta f > 2$ кГц
Почва средней влажности	0.185	0.537	2.082	341.78
Сухая почва	3.236	0.031	11.79	60.332

Отсюда следует ещё одно выражение для КПД

$$\text{КПД} = \frac{Q}{Q_0}. \quad (7)$$

Полоса согласования ($2\Delta f$) зависит от добротности Q антенны:

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}, \quad (8)$$

где f_0 – центральная частота полосы согласования.

По изложенной методике вычислены минимально допустимый КПД (η_{min}) и предельно постижимая полоса согласования антенны, габариты которой не превышают размеров выделенного для неё места. Минимально допустимый КПД антенны вычислен при различных условиях эксплуатации радионавигационного комплекса: в условиях умеренных помех (днём) и сильных помех (ночью), на трассах со значительным преобладанием морской поверхности или сухопутного участка с почвой различной влажности.

Результаты расчетов полосы согласования ($2\Delta f$) на крайних частотах рабочего диапазона ($f1$ = 190 кГц, $f2$ = 1750 кГц) приведены в таблицах 1 и 2.

Из результатов расчетов следует, что места, выделенного для размещения антенны приводной радиостанции, будет недостаточно. Антенна в заданных габаритах может обеспечить работу радионавигационного комплекса в условиях умеренного уровня помех (днём). В условиях высокого уровня помех (ночью) на верхней частоте рабочего диапазона и при преобладании на трассе сухой почвы или почвы средней влажности необходима большая мощность излучения. В соответствии с постановкой задачи для достижения необходимой мощности требуется нереализуемо высокий КПД антенны, а при высоком КПД невозможно обеспечить требуемую полосу согласования с передатчиком (2 кГц).

Выводы

При анализе влияния габаритов антенны приводной радиостанции на возможности вывода самолета на аэродром посадки в условиях естественных помех на неоднородных трассах с преобладанием морского или сухопутного участка земной поверхности найдено, что в заданных по условию задачи габаритах (0,5х2,2х3,4 м) невозможно реализовать параметры антенны, которые обеспечили бы требуемую дальность приводной станции в условиях сильных помех на трассах с сухой почвой и почвой средней влажности.

Для обеспечения требуемых параметров следует увеличить размеры антенны и повторить анализ с учетом наихудших условий функционирования радионавигационного комплекса.

Из результатов расчетов следует также, что миниатюризация антенны приводной радиостанции не только желательна, но и возможна. Антенна приводной радиостанции может размещаться в относительно небольшом объёме в пределах палубной надстройки корабля.

Полученные результаты подтверждены результатами трассовых испытаний макетного образца малогабаритной антенны ёмкостного типа, которая имеет такие же размеры, какие указаны в исходных данных для расчетов. Макетный образец разработан, изготовлен и испытан ОАО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и Морская Электроника» (ОАО «НПП «АМЭ», Санкт-Петербург).

Такой анализ электрических параметров малогабаритных конформных антенн может применяться на этапе разработки радиотехнических комплексов интегрированных в конструкцию корабля.

Литература

1. Фок, В. А. Поле от вертикального и горизонтального диполя, приподнятого над поверхностью Земли / В.А. Фок // ЖЭТФ. – 1949. – Т. 19. – № 10. – С. 916–929.

2. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн: учебник для вузов / М.П. Долуханов. – М.: «Связь», 1972. – 336 с.

3. Рекомендация МСЭ-R P.372-10. Радиошум. – МСЭ, 10/2009. – 75 с.

4. Серков, В. П. Распространение радиоволн и антенные устройства / В.П. Серков. – Л.: ВАС, 1981. – 468 с.

5. McLean, J. S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of the electrically small antennas / J.S. McLean // IEEE Trans. Antennas and Prop. – 1996. – Vol. 44. – No. 5. – P. 672–676.